

Sistemas de medida de distância utilizando lasers e as suas aplicações

João António Santos Dias Fonseca

DISSERTAÇÃO PARA OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM

Engenharia Eletrotécnica e de Computadores

Orientador: Professor Doutor António Carlos de Campos Simões Baptista

Coorientador: Professora Doutora Maria João Marques Martins

Coorientador: Professor Doutor João Paulo Neto Torres

Júri

Presidente: Professor Doutor Gonçalo Nuno Gomes Tavares

Orientador: Professor Doutor João Paulo Neto Torres

Vogal: Professor Doutor Jorge Manuel Torres Pereira

Outubro 2016

Agradecimentos

Esta dissertação é o culminar de seis anos de trabalho e dedicação, em que o apoio da família, camaradas, amigos e professores foi fundamental para ultrapassar todos os obstáculos que foram surgindo pelo caminho.

Agradeço aos meus pais que me educaram e apoiaram em todos os momentos e, de modo especial, desde o ingresso na Academia Militar.

Agradeço a todos os professores que contribuíram direta ou indiretamente para a minha formação académica, destacando os orientadores deste trabalho, Professora Maria João Martins, Professor António Baptista e Professor João Torres.

Agradeço à Rita por todo o apoio prestado ao longo destes anos, fundamental a ultrapassar os momentos de maior dificuldade e sacrifício.

Agradeço a todos os camaradas que partilharam comigo momentos únicos nestes seis anos, bem como a todos os amigos e familiares que em momentos distintos estiveram presentes e deram o seu contributo para a minha formação.

Resumo

As medidas óticas vieram oferecer novas formas de determinar distâncias, deformações ou vibrações através de métodos mais precisos e de maior alcance. A evolução tecnológica tem permitido uma melhoria significativa de vários componentes, nos quais se incluem os óticos. Assim, o desenvolvimento de métodos de medida essenciais é crucial para acompanhar o avanço tecnológico.

Nesta dissertação, são estudados os três métodos de medida básicos – a triangulação, a telemetria e a interferometria, abordando as suas principais aplicações, vantagens e desvantagens, e fundamentando teoricamente cada um dos métodos. Ao longo do trabalho mostram-se resultados de rotinas de simulação para cada método. Para o método da triangulação efetuaram-se duas experiências que demonstram o funcionamento do método na medida de distâncias e superfícies.

Para o método da telemetria, estudaram-se montagens experimentais para aplicar o método da telemetria por impulsos e telemetria por comparação de fase na medida de distâncias.

Deste modo, pretende-se construir a base de um futuro desenvolvimento de métodos mais complexos.

Palavras-chave: Medidas Óticas, Triangulação, Telemetria, Interferometria.

Abstract

Optical measuring systems came to offer new ways to determine distances, deformations or vibrations through more accurate and greater range methods. Technological progress has allowed a significant improvement of several components, including the optical ones. Thus, the development of essential measurement methods is crucial to keep up with technological advances.

In this dissertation, the three basic methods of measurement are studied - triangulation, telemetry and interferometry, covering their main applications, advantages and disadvantages, and theoretically substantiating each of the methods. The results of simulation routines for each method are shown along this work. For the triangulation method we made two experiments which demonstrate the functioning of the method in measuring distances and surfaces.

For the telemetry method, experimental setups were studied to apply the method of pulse telemetry and phase comparison telemetry to measure distances.

Thus, it is intended to set up the basis for the future development of more complex methods.

Keywords: Optical Measures, Triangulation, Telemetry, Interferometry.

Índice

Agradecimentos.....	i
Resumo.....	iii
Abstract.....	v
Índice de Tabelas.....	ix
Índice de Gráficos.....	xi
Índice de Figuras	xiii
Lista de Acrónimos e Siglas	xv
Lista de Símbolos	xvii
Capítulo 1.....	1
1. Introdução	1
1.1. Motivação.....	1
1.2. Objetivos.....	1
1.3. Estrutura da Dissertação	2
Capítulo 2.....	3
2. Estado da Arte.....	3
2.1. Evolução das medidas óticas	3
2.2. Triangulação	3
2.3. Telemetria	4
2.4. Interferometria.....	6
Capítulo 3.....	9
3. Fundamentação Teórica dos Métodos Básicos de Medida.....	9
3.1. Teoria do Método Triangulação	9
3.2. Teoria do Método Telemetria por Impulsos	11
3.3. Teoria do Método Telemetria por Comparação de Fase.....	12
3.4. Teoria do Método Interferometria.....	13
3.5. Comparação dos três métodos	14
Capítulo 4.....	17
4. Simulação das Experiências Propostas	17
4.1. Método da Triangulação	17
4.2. Método da Telemetria por Impulsos	27

4.3. Método da Telemetria por Comparação de Fase	32
4.4. Método da Interferometria.....	35
Capítulo 5.....	39
5. Experiências Propostas.....	39
5.1. Método da Triangulação	39
5.1.1. Montagem Experimental	40
5.1.1.1. Laser vermelho de hélio-néon JDS Uniphase 1100 Series	41
5.1.1.2. Detetor Model 818-sl	42
5.1.2. Resultados Obtidos	42
5.1.3. Erros experimentais.....	44
5.2. Método da Telemetria por Impulsos	45
5.2.1. Montagem Experimental	45
5.2.1.1. Placa PCB.....	46
5.3. Método da Telemetria por Comparação de Fase	56
5.3.1. Montagem Experimental.....	56
5.3.1.1. Placa PCB.....	57
Capítulo 6.....	63
6. Conclusões e perspectivas de trabalho futuro.....	63
6.1. Conclusões	63
6.2. Perspetivas de trabalho futuro	65
Referências Bibliográficas	67
Apêndice 1	- 1 -
Apêndice 2	- 2 -

Índice de Tabelas

Tabela 1 - Comparação dos três métodos básicos de medida.....	15
Tabela 2 - lógica da porta XNOR	50
Tabela 3 - Nomes dos pinos do contador 74LS192N.....	51
Tabela 4 - Correspondência entre a contagem decimal e a saída em binário	51
Tabela 5 - Valores lógicos dos pinos do decodificador.....	52

Índice de Gráficos

Gráfico 1 - Resultados obtidos na simulação do método da triangulação	26
Gráfico 2 - Resultados obtidos no método da triangulação	44

Índice de Figuras

Figura 1 - Técnica de medição em função da distância	3
Figura 2 - Método da Triangulação	4
Figura 3 - Diagrama de blocos do método telemetria por impulsos	5
Figura 4 – Interferómetro de Michelson	6
Figura 5 - Interferómetro de Mach-Zehnder	7
Figura 6 - Interferómetro de Fabry-Pèrot	7
Figura 7 - Princípio da Triangulação	9
Figura 8 - Geometria da Projeção de Franjas	10
Figura 9 - Exemplo de aplicação do método da triangulação	10
Figura 10 - Representação do sistema de telemetria de impulsos com laser	11
Figura 11 - Representação do sistema de telemetria por comparação de fase	12
Figura 12 - Exemplo do princípio de Interferometria	14
Figura 13 – a) Esquema da experiência b) Esquema da simulação	18
Figura 14 - Fluxograma do programa do método triangulação	19
Figura 15 - Superfícies da face 5 do dado	20
Figura 16 - Superfícies desenhadas na matriz com o laser e o detetor	21
Figura 17 - Posição do detetor e do laser na matriz	22
Figura 18 – Viagem de impulso laser	23
Figura 19 - Movimento na matriz	24
Figura 20 - Fluxograma do programa do método telemetria por impulsos	28
Figura 21 - Representação do laser/detetor e do objeto na matriz	29
Figura 22 – Atualização das variáveis 'a' e 'n' durante o percurso do impulso laser	30
Figura 23 - Fluxograma do programa de telemetria por comparação de fase	32
Figura 24 - Esquema com matriz do método da interferometria	36
Figura 25 - Representação esquemática da geometria da experiência	39
Figura 26 - Montagem experimental para o método da triangulação	41
Figura 27 - Zonas da face 5 do dado	43
Figura 28 - Esquema da experiência do método da telemetria por impulsos	46
Figura 29 - Esquema da montagem da telemetria por impulsos no EAGLE 7.2.0	47
Figura 30 - Fotodíodo SFH2701	48
Figura 31 - a) Configuração dos pinos do THS4021 b) Circuito interno do THS4021 ...	49
Figura 32 - Configuração dos pinos do contador 74LS192N	50
Figura 33 - Configuração dos pinos do decodificador 4511N	52
Figura 34 - Configuração dos pinos do display SA52-11EWA	53
Figura 35 - Configuração dos pinos do relógio SG-615P C25.0000M	54
Figura 36 - Placa PCB virtual do método telemetria por impulsos elaborada no EAGLE 7.2.0	55

Figura 37 - Camada superior e inferior da placa PCB.....	56
Figura 38 - Esquema da experiência do método da telemetria por impulsos.....	57
Figura 39 - Esquema da montagem da telemetria por comparação de fase no EAGLE	
7.2.0	58
Figura 40 - Diagrama funcional do PLL	58
Figura 41 - Tensão de saída do segundo comparador em relação à diferença de fase dos	
sinais	59
Figura 42 - Configuração dos pinos do ADC 0820N	60
Figura 43 - placa PCB virtual do método telemetria por comparação de fase elaborada	
no EAGLE 7.2.0	62

Lista de Acrónimos e Siglas

ADC	Analog-to-Digital Converter
AGC	Automatic Gain Control
APD	Avalanche Photodiode
CLS	Collimated Laser Source
FP	Fabry-Pèrot
LADAR	Laser Detection and Ranging
LD	Laser Diode
LE	Latch Enable
LED	Light Emitting Diode
LIDAR	Light Detection and Ranging
LT	Lamp Test
MR	Master Reset
PCB	Printed Circuit Board
PLL	Phase-Locked Loop
PSD	Position Sensitive Detector
RADAR	Radio Detection and Ranging
SM	Self-mixing
UAV	Unmanned Aerial Vehicles
VCO	Voltage-Controlled Oscillator
XNOR	Exclusive-NOR

Lista de Símbolos

Símbolo	Designação	Unidade
c	Velocidade da Luz	m/s
d	Distância entre laser e detetor	m
D	Distância a medir	m
D_{inc}	Incerteza na medida	m
f_{clk}	Frequência do relógio	Hz
g	Ganho em unidades lineares	-
G	Ganho em decibéis	dB
I_E	Intensidade do feixe emitido	A
I_R	Intensidade do feixe refletido	A
L	Diferença entre os caminhos dos dois braços do interferómetro	m
m	Ampliação transversal da lente	-
N	Número de dígitos contados	-
P_{otica}	Potência ótica emitida	W
P_{rec}	Potência recebida	W
P_n	Entrada de dados em paralelo	-
Q_n	Saída de dados no contador	-
R_F	Resistência de realimentação	Ω
R_G	Resistência de entrada inversora	Ω
S	Área ótica do recetor	m ²
t_d	Tempo-de-voo	s
T	Período	s
V_{PC2out}	Tensão de saída do segundo comparador	V
α, β	Ângulos do triângulo ABC	°
$\Delta\lambda$	Diferença de comprimento de onda	m
$\Delta\phi$	Diferença de fase	rad
θ	Ângulo entre o plano detetor/laser e o plano detetor/alvo ou laser/alvo	rad
θ_1	Ângulo incidente	°
θ_2	Ângulo refletido	°
ρ	Coeficiente de reflexão	-
τ	Coeficiente de transmissão	-
φ_{COMPin}	Fase do primeiro fotodetetor	rad
φ_{SIGin}	Fase do segundo fotodetetor	rad
ν_M	Frequência de modulação	Hz
λ	Comprimento de onda	m

Capítulo 1

1. Introdução

1.1. Motivação

Os vestígios de utilização de técnicas de medição e de manutenção de padrões de referência são muito antigos. Sem métodos de medição cuidados e sem padrões de referência, não seria possível construir os grandes monumentos egípcios, maias ou astecas [1].

Em 1960 o físico Theodore Maiman [2] construiu o primeiro laser, e desde então começaram a ser desenvolvidas aplicações para dar uso à nova descoberta. Uma das aplicações mais importantes e de maior relevo para este trabalho foi a utilização de lasers nos métodos de medida.

Hoje em dia, as tecnologias de medida de distância com lasers abrangem um vasto campo de aplicações. Assim, é de todo o interesse desenvolver um conjunto de rotinas de simulação e montagens experimentais que evidenciem algumas destas aplicações para permitir o futuro desenvolvimento de sistemas mais complexos.

No domínio militar, há diversos sistemas que podem vir a usufruir de sistemas mais complexos de métodos de medida. Com o avanço da tecnologia, o soldado humano convencional está a ser substituído por sistemas controlados remotamente, tais como robôs, UAVs e mísseis teleguiados. Todos estes sistemas melhorariam o seu desempenho e robustez com a incorporação de um sistema de medida laser que lhes permitisse verificar a que distância se encontram de determinado objeto ou alvo. Também no fabrico de material militar, como carros de combate, munições, armamento, entre outros, podem ser usados sistemas de medida laser de deformação para verificar se o material está em condições de ser utilizado.

1.2. Objetivos

O principal objetivo desta dissertação consiste na introdução aos principais métodos de medida de distâncias utilizando os lasers. Irão ser abordados os seguintes métodos: a triangulação, a telemetria e a interferometria. Pretende-se verificar quais as vantagens e desvantagens de cada método, bem como analisar a sua aplicação na medida direta de distâncias e no estudo da deformação de superfícies.

Inicialmente pretende-se estudar teoricamente cada um dos métodos, abordando os procedimentos e as fórmulas utilizadas para medir distâncias. Numa fase posterior, pretende-se simular cada um dos métodos recorrendo a um software de programação. O objetivo é medir distâncias com cada método e aplicar o método da triangulação para estudar a superfície de uma face de um dado.

Para terminar, pretende-se propor experiências semelhantes aos cenários de simulação para comparar os resultados práticos com os resultados teóricos. O principal foco é efetuar as experiências para o método da triangulação (medir a distância e a superfície de uma face de um dado). No caso da

telemetria pretende-se estudar duas montagens experimentais (uma para telemetria por impulsos e outra para telemetria por comparação de fase) que façam uso deste método.

1.3. Estrutura da Dissertação

A presente dissertação está estruturada em seis capítulos que a seguir se descrevem:

- Capítulo 1: Introdução – Neste capítulo começa-se por descrever as motivações que estão na origem da dissertação. De seguida, abordam-se os objetivos que se pretendem atingir na dissertação. Por último refere-se a estrutura da dissertação, que descreve o conteúdo de cada capítulo apresentado;
- Capítulo 2: Estado da Arte – Este capítulo começa com uma evolução histórica das medidas óticas para depois ser descrito o funcionamento de três métodos de medida básicos: a triangulação, a telemetria e a interferometria;
- Capítulo 3: Fundamentação Teórica dos Métodos Básicos de Medida – Neste capítulo analisa-se cada um dos métodos básicos referidos apresentando a sua fundamentação teórica, concluindo com uma comparação dos três métodos;
- Capítulo 4: Simulação das Experiências Propostas – Neste capítulo descrevem-se as simulações realizadas sobre cada método de medida estudado e fundamentado anteriormente;
- Capítulo 5: Experiências Propostas – Neste capítulo descrevem-se as experiências propostas sobre cada método de medida simulado anteriormente. Apresentam-se os resultados obtidos e uma comparação com os resultados de simulação;
- Capítulo 6: Conclusões e perspetivas de trabalho futuro – Neste capítulo abordam-se as ideias principais da dissertação, concluindo as componentes teórica, de simulação e prática de cada método apresentado na dissertação de mestrado proposta. Por fim, salienta-se a pertinência da realização de novos trabalhos que deem continuidade ao trabalho desenvolvido e da elaboração de novos estudos sobre temas relacionados com o tratado nesta dissertação.

Capítulo 2

2. Estado da Arte

2.1. Evolução das medidas óticas

As medidas óticas são usadas em diversas situações, como por exemplo: na medição de deformações de objetos, na medição de vibrações ou na medição de distância, sendo este último o aspecto mais focado nesta dissertação.

Os métodos de medida de distância óticos podem ser agrupados em três categorias: a triangulação, a telemetria, que se baseia na determinação do denominado tempo-de-voo, e a interferometria. Nos últimos anos, tem sido feito um progresso considerável nas medidas óticas através do entendimento dos princípios físicos básicos e da informação teórica acerca do alcance de detecção [3]. O avanço na criação de lasers, dispositivos óticos integrados, emissores e recetores eletrônicos levou a novos desenvolvimentos nos métodos de medida. A Figura 1 mostra a técnica de medição mais apropriada em função da distância a medir [4].

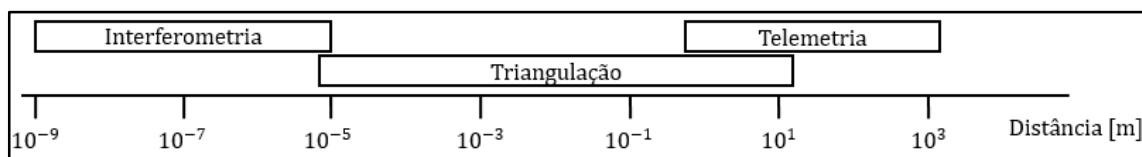


Figura 1 - Técnica de medição em função da distância

Hoje em dia os três métodos são usados em múltiplas aplicações, como a seguir se descreve.

2.2. Triangulação

A triangulação é um método que permite a determinação de distâncias ou posições de objetos a partir de considerações baseadas na geometria de triângulos semelhantes. Este método foi usado por volta do ano 600 a.C.¹ pelo matemático grego Thales de Mileto na medição da altura das pirâmides de Gizé e na determinação da distância até um navio que se encontrava no mar [5].

A triangulação pode ser usada para digitalização em 3D. A digitalização de formas requer um sistema com medidas de precisão elevada. Aplicações de digitalização 3D cobrem um amplo espectro no design industrial, na fabricação, na simulação, na inspeção e na comunicação visual [3].

O método de triangulação pode ser usado para medidas de deformações de objetos. As técnicas sombra de Moiré e franjas projetadas baseiam-se no princípio da triangulação [6]. As duas técnicas vão ser fundamentadas teoricamente no Capítulo 3. Uma das áreas em que uma aplicação

¹ a.C. – antes de Cristo

deste método tem sucesso é a medicina, por exemplo, na detecção de escoliose (desvio da coluna vertebral), que pode ser diagnosticada pela assimetria das franjas de Moiré na parte de trás do corpo.

Também na medição de distâncias se pode utilizar o método da triangulação. Um sensor ótico baseado em triangulação é um exemplo simples da aplicação deste método. Uma fonte de laser colimada² (CLS) é usada para iluminar o alvo (pode ser um objeto, uma pessoa, etc.) a ser medido. A luz refletida pelo alvo é detetada por um sistema de receção colocado lateralmente em relação à fonte laser, constituído, por exemplo, por uma lente e um detetor sensível à posição (PSD). Como se pode observar na Figura 2, a distância ao alvo pode ser determinada a partir da semelhança dos triângulos formados. Note-se que estes sensores óticos, nos quais a fonte laser e o detetor estão no mesmo dispositivo, são tipicamente aplicados para medir distâncias entre 10 mm e 1 m [5].

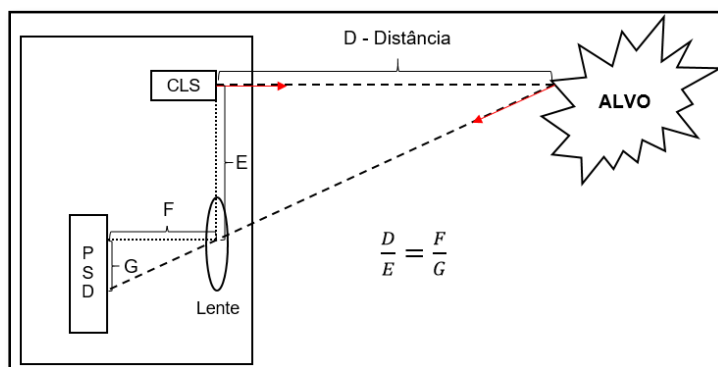


Figura 2 - Método da Triangulação

2.3. Telemetria

As técnicas de medida de distância utilizando o método de telemetria foram originalmente usadas em aplicações militares e em aplicações de levantamento topográfico. Há dois métodos básicos de telemetria: o método de telemetria por impulsos e o método de telemetria por comparação de fase.

O método de telemetria por impulsos baseia-se na determinação do tempo que um impulso de energia demora a viajar desde o emissor até ao alvo e depois de volta ao detetor – o tempo de voo t_d . A fonte de energia é a luz e o parâmetro relevante envolvido na contagem é a velocidade da luz³ (c). A distância pretendida é determinada multiplicando a velocidade da luz por metade do tempo t_d . Note-se que, neste caso, mede-se o tempo relativo a uma distância que não é diretamente a distância ao alvo, mas que é facilmente calculada devido ao conhecimento da distância extra. Para obter 1 mm de precisão na medida de distância, a precisão da medida do intervalo de tempo deve ser de 6.7 ps. A Figura 3 mostra um diagrama de blocos que exemplifica o funcionamento do método [3].

² O desvio do feixe de laser ronda mediamente o milésimo de radiano, ou seja, depois de ter percorrido mil metros, o feixe fica com um diâmetro de apenas um metro

³ Velocidade da luz, c , é de aproximadamente 299792458 metros por segundo

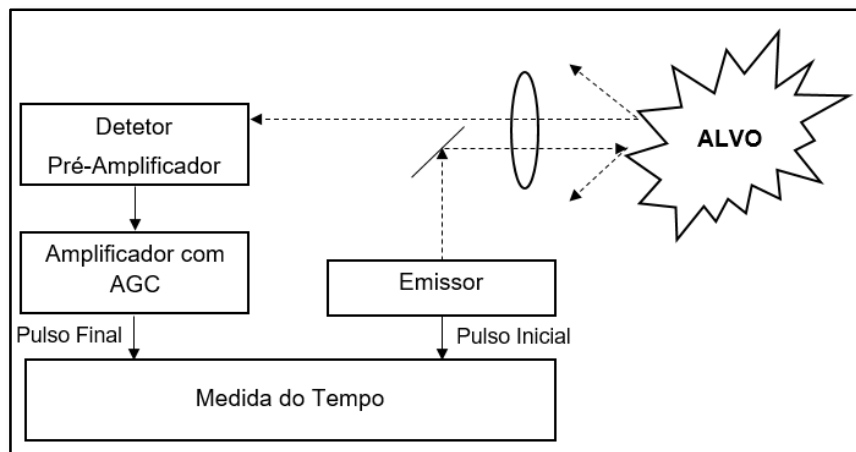


Figura 3 - Diagrama de blocos do método telemetria por impulsos

Neste diagrama, um emissor envia um impulso laser para um medidor de tempo, que inicia a contagem do tempo de voo, e para um espelho que reflete o laser para uma lente que o direciona para o alvo. Este reflete o feixe para a mesma lente que o direciona para um detetor. Este envia o sinal detetado para um amplificador com controlo automático de ganho (AGC), que reconstrói o impulso e o envia para o medidor de tempo, terminando a contagem do intervalo de tempo pretendido. Este método é particularmente apropriado para aplicações que envolvem distâncias superiores a 1 m. Assim, a vantagem no uso de um sistema com este método aumenta com o aumento da distância a ser medida.

O método de telemetria por comparação de fase usa uma fonte ótica modulada em frequência ou em intensidade: o díodo laser. Segundo esta técnica, a luz refletida pelo alvo é detetada de forma coerente para obter o desvio de fase ótico entre o sinal emitido e o recebido. Os resultados mostram muita fiabilidade na medida até 1,5 metros com resolução abaixo do centímetro [7]. O método de telemetria por comparação de fase usando uma fonte ótica modulada em intensidade foi o primeiro a ser testado, sendo de mais fácil entendimento. Assim, para se perceber o funcionamento do método, no capítulo 3 será fundamentado um método de telemetria por comparação de fase usando uma fonte ótica modulada em intensidade.

EM 2004, A *OSRAM Opto Semiconductors* lança uma *Application Note*, descrevendo um método de telemetria usando um impulso laser. Normalmente, os impulsos de laser são emitidos em sequências (pacotes de impulsos múltiplos) com frequência de repetição de vários kHz dentro da sequência. Ao usar sequências, o detetor, recebendo vários impulsos, pode fazer uma média para calcular o valor da distância. O intervalo de tempo entre sequências é de cerca de 10 ms [8].

Em 2006, a revista *Quarterly Journal of Technology & Education* publicou um trabalho científico comparando três métodos de medida, sendo um deles a telemetria de impulsos. Do estudo realizado, é referido que o método tem uma incerteza de 5 metros (devido à frequência do relógio utilizado – 30 MHz) medindo distâncias entre 300 m e 20 km [9].

Um dos sistemas mais conhecidos que usa o método de telemetria de impulsos é o LIDAR (*Light Detection and Ranging*). Quando a luz deriva de uma fonte laser é designado por LADAR (*Laser Detection and Ranging*), sendo o seu funcionamento semelhante ao de um RADAR (*Radio Detection and Ranging*), com a diferença no sinal emitido: no RADAR é emitido um sinal rádio de alta frequência

enquanto no LADAR é emitido um impulso laser. Um sistema LADAR tem diversas aplicações – levantamentos topográficos, detecção em duas e três dimensões de objetos, detecção de vibrações, estudo da atmosfera (medida do vento, temperatura, pressão, etc.), entre outras. Tem também uma grande aplicação militar, sendo frequentemente incorporado em mísseis para detectar ou medir a distância até aos alvos [10].

2.4. Interferometria

Aquando do aparecimento de diversas missões espaciais baseadas em instrumentos constituídos por satélites independentes a trabalhar cooperativamente, a importância da metrologia ótica aumentou significativamente, por envolver incertezas de medida entre os 10 μm e os 10 nm [11].

Para se atingir esta resolução, o método adequado é o da interferometria. Neste método, a distância é medida através da diferença de fases entre duas ondas, em que uma das ondas é conhecida. Para a aplicação deste método foram inventados diversos interferómetros, dos quais se destacam o interferómetro de *Michelson*, o interferómetro de *Fabry-Pérot* e o interferómetro de *Mach-Zehnder*. Nesta secção serão explicados os três interferómetros referidos, salientando a sua importância para este trabalho.

O interferómetro de *Michelson* foi o primeiro a ser inventado (resulta da experiência de *Michelson-Morley* em 1887). Este consiste na divisão do feixe de luz que percorre dois caminhos. Após reflexão no alvo, os sinais refletidos são recombinados num detetor, produzindo um padrão de interferência. A Figura 4 mostra o funcionamento deste interferómetro em que a fonte emissora é um díodo laser [12].

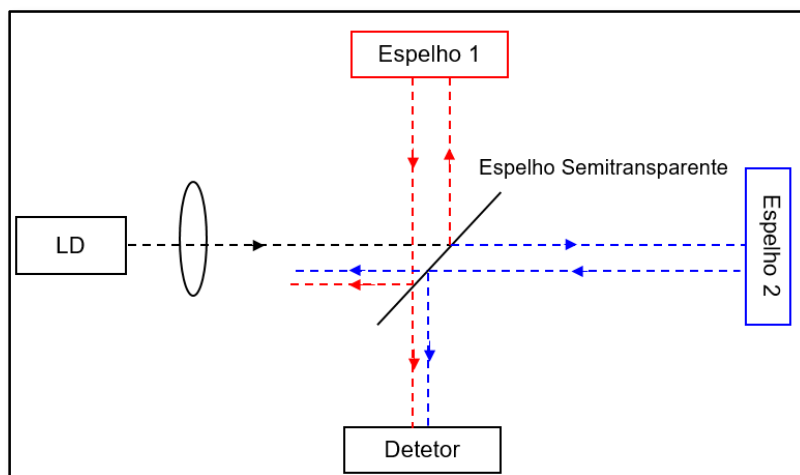


Figura 4 – Interferómetro de Michelson

Neste exemplo, a luz emitida pelo díodo laser (LD) é colimada por uma lente e direcionada para um interferómetro de *Michelson*. A diferença de fase entre os dois feixes é determinada no detetor e, a partir dessa diferença, calcula-se a diferença de tamanho dos dois braços do interferómetro. Este método é utilizado essencialmente para medir distâncias, pelo que é importante para este trabalho. A forma como a medida é feita será detalhada na fundamentação teórica no Capítulo 3.

Em 1892 Ludwig Mach aperfeiçoa um artigo de 1891 elaborado por Ludwig Zehnder, originando o interferômetro de *Mach-Zehnder*. Este tem um princípio semelhante ao interferômetro de *Michelson*. A radiação proveniente de uma fonte laser é colimada e dividida em dois feixes, direcionando-os para dois espelhos. Os feixes são refletidos pelos espelhos e vão para outro divisor de feixes (semelhante ao espelho semitransparente usado no interferômetro de *Michelson*). O padrão de interferência é observado na saída 1 ou na saída 2. A Figura 5 mostra o funcionamento de um interferômetro de *Mach-Zehnder*.

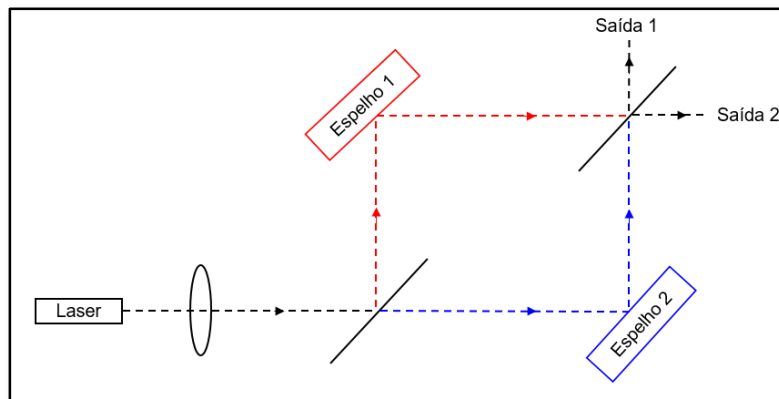


Figura 5 - Interferômetro de Mach-Zehnder

A característica principal deste interferômetro é a possibilidade de fazer com que a luz comute entre uma e outra saída, variando a diferença de caminhos óticos. É de grande importância em comunicações óticas porque possibilita alterar a direção de tráfego do sinal [13]. Não é de grande relevância para este trabalho, pois, geralmente, não é utilizado para medições.

Em 1899, Charles Fabry e Alfred Pèrot propuseram uma cavidade ótica de extrema simplicidade, designada de interferômetro de *Fabry-Pèrot* (FP). Esta é constituída por dois espelhos planos semitransparentes, que se encontram dispostos ao longo de um eixo comum de modo a que as suas superfícies semirefletoras sejam paralelas entre si. Um dos espelhos é mantido fixo enquanto o outro está montado sobre um suporte móvel – similar ao usado no interferômetro de *Michelson*. O espelho “móvel” pode ser aproximado ou afastado do espelho fixo com o auxílio de um micrómetro acoplado. Isto é feito de forma a garantir que os espelhos permaneçam paralelos com precisão até um segundo de arco [14]. A Figura 6 mostra o funcionamento de um interferômetro de *Fabry-Pèrot*.

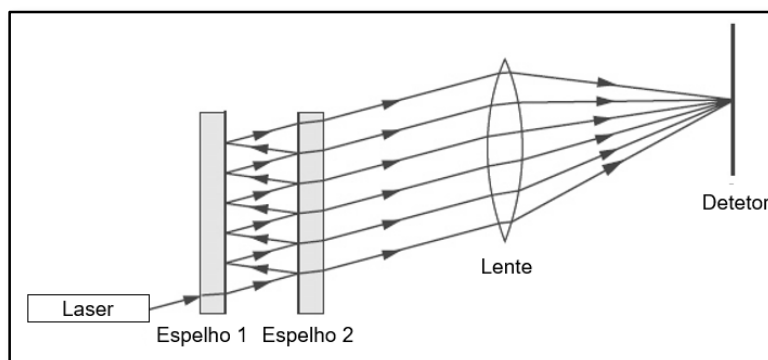


Figura 6 - Interferômetro de Fabry-Pèrot

Este dispositivo, geralmente, é usado para medidas de comprimento de onda com alta precisão e para o estudo da estrutura de linhas espectrais, pelo que não tem grande relevância para este trabalho [13].

Após análise dos três interferômetros, conclui-se que o interferômetro de *Michelson* é bastante importante para medir distâncias com resolução até ao nm. A interferometria tem outros campos com diferentes aplicações, que serão abordados de seguida.

“A interferometria ótica coerente é uma das mais interessantes técnicas para a metrologia absoluta de comprimento. Sem qualquer deslocamento dos espelhos que definem os braços do interferômetro, as medições são feitas sem ambiguidade, através da utilização de um comprimento de onda resultante de um varrimento na frequência ótica” [11]. A interferometria de varrimento de frequência é muito eficiente quando a complexidade e a robustez são parâmetros importantes, como é o caso de instrumentação para o espaço.

Outro campo da interferometria é a de *self-mixing* (SM). O uso deste método tem vindo a crescer desde meados de 1960, com crescimento acentuado em finais de 2000, devido à melhoria das técnicas de fabricação de lasers semicondutores, pois estes são mais baratos e oferecem maior qualidade numa vasta gama de aplicações [15]. O efeito SM conduz a instrumentos de medida precisos e exatos, para medidas de distância, deteção de vibrações e caracterização de velocidade de sólidos, líquidos e plasmas. Este efeito é baseado no efeito de retroação gerado pela luz ao iluminar um alvo distante e retornando à cavidade laser. Uma aplicação prática deste método é a monitorização da pulsação sanguínea na biomedicina [16].

Capítulo 3

3. Fundamentação Teórica dos Métodos Básicos de Medida

3.1. Teoria do Método da Triangulação

O princípio básico da triangulação consiste na medida de distância entre um ponto A e um ponto C. A Figura 7 mostra o princípio da triangulação.

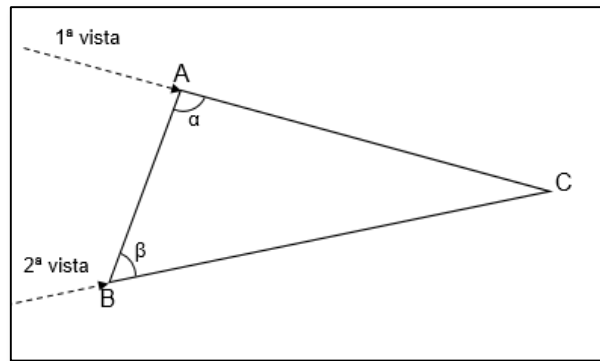


Figura 7 - Princípio da Triangulação

Através do conhecimento dos ângulos α e β , e da distância AB, é possível obter as distâncias AC e BC através de cálculos simples. A expressão (1) representa as relações trigonométricas do triângulo da Figura 5.

$$\frac{\sin \alpha}{BC} = \frac{\sin \beta}{AC} = \frac{\sin(\pi - \alpha - \beta)}{AB} \quad (1)$$

Assim, as distâncias AC e BC podem ser determinadas através das expressões (2) e (3).

$$AC = \frac{AB \cdot \sin \beta}{\sin(\alpha + \beta)} \quad (2)$$

$$BC = \frac{AB \cdot \sin \alpha}{\sin(\alpha + \beta)} \quad (3)$$

A Figura 2, que mostra o exemplo de um sensor de medida baseado em triangulação, demonstra outra forma de medir distâncias. Neste exemplo, a distância D é calculada através da expressão (4).

$$D = \frac{F \times E}{G} \quad (4)$$

Como as distâncias E e F são conhecidas, através da medição do valor de G (neste caso, através do PSD), calcula-se a distância D pretendida.

No capítulo 2.2 refere-se que as sombras de Moiré e franjas projetadas são técnicas baseadas no princípio da triangulação. O fenómeno de Moiré nota-se quando se sobrepõe duas redes. Essas estruturas são constituídas por linhas paralelas ou radiais, círculos, elipses ou até mesmo por um

conjunto de pontos espaçados, equidistantes ou não. Na técnica sombra de Moiré, a rede cujas faixas claras são transparentes é colocada à frente do objeto. Quando a rede é iluminada por uma fonte, a sombra dela é projetada sobre a superfície do objeto, gerando a rede modelo. As franjas de Moiré são formadas pela interferência das duas redes, quando o observador olha através da rede de referência [17]. A Figura 8 mostra a geometria de uma projeção de franjas.

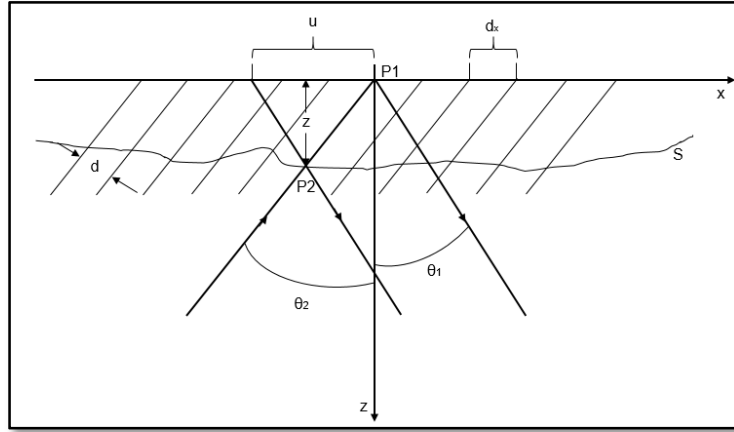


Figura 8 - Geometria da Projeção de Franjas

Para entender bem o princípio referido, considere-se um exemplo de um feixe de laser a incidir numa superfície segundo um ângulo incidente θ_1 , onde o ponto de luz é refletido na superfície e direcionado, por uma lente, para um detetor. O eixo ótico da lente faz um ângulo θ_2 (ângulo refletido) com a normal à superfície. Supõe-se que o objeto se move a uma distância s perpendicular à sua superfície. A Figura 9 mostra o exemplo considerado [6].

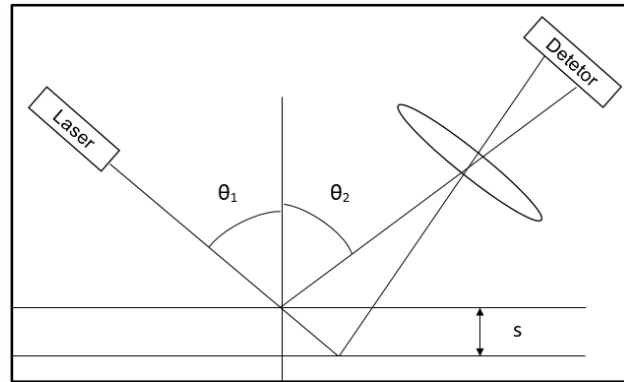


Figura 9 - Exemplo de aplicação do método da triangulação

Observando a Figura 9, através de relações trigonométricas simples, verifica-se que o movimento correspondente ao ponto refletido no detetor é dado pela expressão (5), em que m representa a ampliação transversal da lente (no Apêndice 1 encontra-se a dedução da expressão (5)).

$$s' = m \frac{s \times \sin(\theta_1 + \theta_2)}{\cos\theta_1} = ms(\tan\theta_1 \cos\theta_2 + \sin\theta_2) \quad (5)$$

O detetor é sensível à posição, tal como o PSD da Figura 1, pelo que dá uma tensão de saída proporcional à distância entre o ponto de luz e o centro do detetor. É o centro geométrico do ponto de

luz que é detetado, logo, a medida de posição é independente do diâmetro do ponto, desde que este esteja dentro da área do detetor. A posição de um feixe de laser diretamente incidente num detetor destes pode ser determinada com uma precisão inferior a 1 μm . Observando a expressão (5), vê-se que o movimento pode ser ampliado pela lente, aumentando a sensibilidade. No entanto, o tamanho da mancha de luz também é ampliado e deve estar sempre dentro da área do detetor para evitar erros de medição, limitando, assim, a ampliação utilizável. Para fazer medições com maior detalhe (menores distâncias), o diâmetro do feixe de laser tem de ser maior.

3.2. Teoria do Método Telemetria por Impulsos

Como foi referido no capítulo 2.3, um sistema de telemetria por impulsos com laser usando a medida do tempo-de-voo é um exemplo prático de aplicação deste método. A distância é determinada medindo o tempo de ida e volta de um impulso laser. Com a redução da largura dos impulsos do sinal, a potência de saída do sinal laser é fortemente aumentada e a relação sinal-ruído também aumenta consideravelmente. Como exemplo, aplicando a expressão (6), considerando 1% de reflexão do objeto e 75% de perdas médias de transmissão e assumindo uma lente ótica perfeitamente redonda, numa distância máxima de 20 km medida por uma fonte laser com 1.5 MW, a potência refletida será de apenas 70.3 nW [9].

$$P_{rec} = \frac{\rho \cdot \tau \cdot S}{\pi \cdot D^2} P_{otica} \quad (6)$$

Note-se que ρ é o coeficiente de reflexão do objeto, τ é o coeficiente de transmissão (multiplicação do coeficiente de transmissão ótico pelo coeficiente de transmissão do meio), S é a área ótica do recetor, P_{otica} é a potência ótica emitida e $2D$ a distância percorrida pelo laser. A Figura 10 mostra o esquema representativo deste sistema.

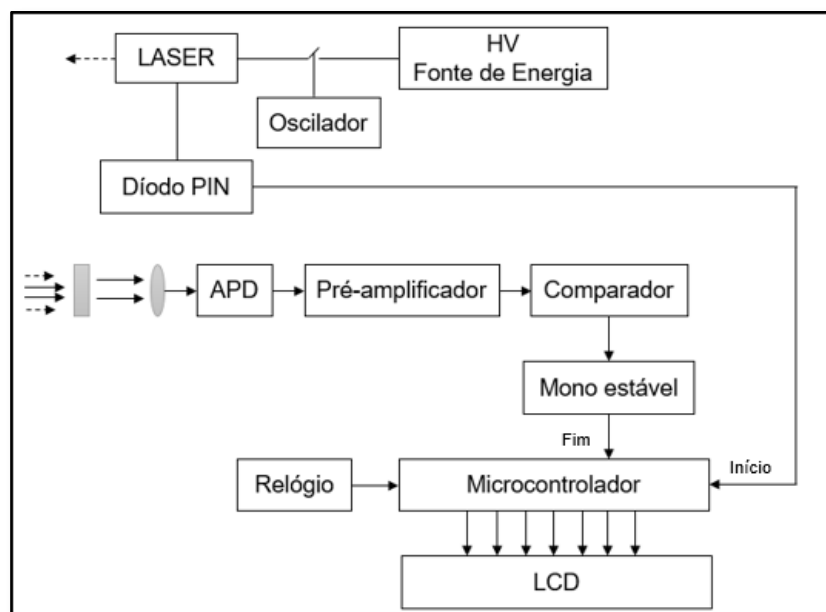


Figura 10 - Representação do sistema de telemetria de impulsos com laser

Como se pode observar na Figura 10, quando o sinal inicial é recebido (Início), um contador é ativado até chegar o sinal final (Fim). Depois de percorrer uma distância de $2D$, o feixe laser entra num fotodíodo de avalanche (APD), gerando um sinal elétrico cuja tensão é amplificada atuando seguidamente no microcontrolador, parando a contagem. A distância entre o objeto e o emissor é dada pela expressão (7), em que f_{clk} é a frequência do relógio e N é o número de dígitos contados entre o sinal inicial e o final [9].

$$D = \frac{N \cdot c}{2f_{clk}} \quad (7)$$

Através da frequência do relógio, é possível calcular o tempo necessário para que o contador efetue uma contagem. No sistema representado na Figura 10, a frequência do relógio é de 30 MHz. A expressão (8) mostra o tempo (T) que passa entre cada incremento na contagem.

$$T = \frac{1}{f_{clk}} = \frac{1}{30 \times 10^6} = 33.3 \text{ ns} \quad (8)$$

Com este T calculado, é possível determinar a incerteza de medida deste sistema. À velocidade da luz (c), durante este período de tempo, e com recurso à expressão (9), calcula-se a distância ($2D_{inc}$) percorrida pelo impulso laser.

$$2D_{inc} = c \times T = 10 \text{ m} \quad (9)$$

Assim, conclui-se que, no percurso de ida e volta, o sistema de contagem pode cometer um erro até 10 m, pelo que a incerteza de medida máxima da distância D é metade deste valor, ou seja, 5 m.

Através da expressão (7), a distância ao objeto é calculada, sendo este um processo simples e útil para longas distâncias, pois apresenta uma incerteza de medida de 5 metros, o que para distâncias reduzidas implica um erro relativo não desprezável.

3.3. Teoria do Método Telemetria por Comparação de Fase

No método de telemetria por comparação de fase, um feixe laser modulado em intensidade (como foi referido no capítulo 2.3, também pode ser modulado em frequência) é enviado na direção do alvo. De modo a efetuar a comparação de fase, um feixe laser de referência é enviado diretamente para um medidor de comparação de fase. A Figura 11 mostra um esquema do método [4].

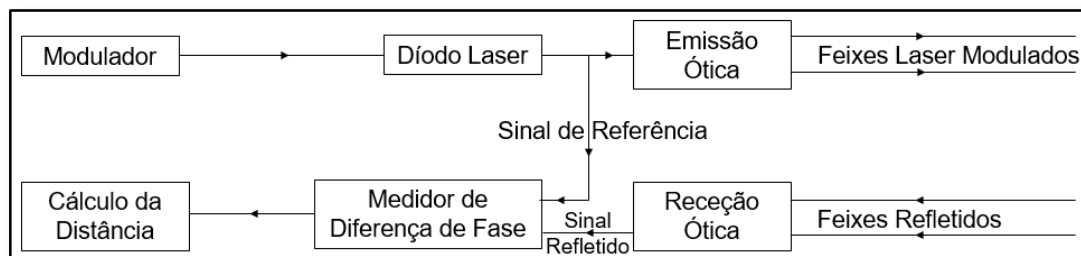


Figura 11 - Representação do sistema de telemetria por comparação de fase

Seja ν_M a frequência de modulação do feixe, a expressão (10) representa a intensidade do feixe emitido.

$$I_E = I_0(1 + \cos 2\pi\nu_M t) \quad (10)$$

Sendo o tempo de retorno do sinal $2D/c$, em que D é a distância que se quer determinar, a expressão (11) representa a intensidade do feixe refletido.

$$I_R = I_0 \left(1 + \cos 2\pi\nu_M \left(t - \frac{2D}{c} \right) \right) \quad (11)$$

Assim, a expressão (12) representa a defasagem do sinal.

$$\Delta\varphi = 4\pi\nu_M \frac{D}{c} \quad (12)$$

A distância D que se pretende determinar pode ser determinada pela expressão (13).

$$D = \frac{c(\Delta\varphi + 2k\pi)}{4\pi\nu_M} \quad (13)$$

Sendo k um valor inteiro, a distância D terá sempre uma indeterminação neste valor. Para solucionar o problema, utilizam-se duas frequências de modulação suficientemente próximas para que k não se altere. Assim, a distância pode ser calculada pela expressão (14), onde ν_M e ν_M' são as frequências de modulação utilizadas.

$$D = \frac{c(\Delta\varphi_0 + 2k\pi)}{4\pi\nu_M} = \frac{c(\Delta\varphi_0' + 2k\pi)}{4\pi\nu_M'} \quad (14)$$

Assim, consegue-se eliminar o valor de k da expressão. A expressão (15) representa a distância D que se pretende determinar.

$$D = \frac{c(\Delta\varphi_0 - \Delta\varphi_0')}{4\pi(\nu_M - \nu_M')} \quad (15)$$

Para determinar o erro associado a este cálculo, o autor indica que a diferença de fase $\Delta\varphi$ tem um erro de 0.7 mrad. Através da expressão (13), com uma frequência de modulação de 30 MHz, obtém-se um erro de 0,557 mm na medida.

3.4. Teoria do Método Interferometria

Considere-se o exemplo apresentado no capítulo 2.4, no qual a luz emitida por um díodo laser é colimada numa lente e incide num interferómetro de *Michelson*. A diferença L entre os caminhos dos dois braços do interferómetro é o dobro da distância D que se quer medir. A Figura 12 mostra o exemplo considerado [12].

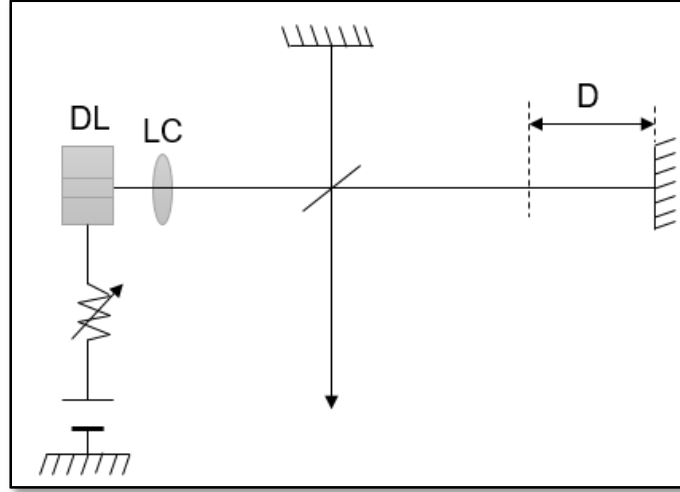


Figura 12 - Exemplo do princípio de Interferometria

A correspondente diferença de fase calcula-se com a expressão (16.1), em que λ é o comprimento de onda da luz do laser [12].

$$\Delta\phi = \frac{2\pi L}{\lambda} \quad (16.1)$$

Quando o comprimento de onda é alterado de λ para $\lambda + \Delta\lambda$ através de uma alteração na corrente de injeção do laser, a diferença de fase também sofre uma alteração, como mostra a expressão (16.2).

$$\Delta\phi = 2\pi L \left(\frac{1}{\lambda} - \frac{1}{\lambda + \Delta\lambda} \right) \quad (16.2)$$

Se a alteração do comprimento de onda for mínima em comparação com o comprimento de onda, pode-se aproximar a diferença de fase através da expressão (16.3).

$$\Delta\phi \cong 2\pi L \frac{\Delta\lambda}{\lambda^2} \quad (16.3)$$

Como λ e $\Delta\lambda$ são valores conhecidos, pode-se determinar a distância pretendida através da diferença entre os caminhos dos dois braços do interferômetro através da expressão (17).

$$D = \frac{L}{2} \cong \frac{\Delta\phi \lambda^2}{4\pi \Delta\lambda} \quad (17)$$

É preciso ter em conta que o comprimento de onda da luz do laser varia com a corrente de injeção e com a temperatura. Normalmente, o comprimento de onda da luz aumenta 0.005 nm por cada mA de corrente a um comprimento de onda de 800 nm, e aumenta 0.04 nm por cada °C.

3.5. Comparação dos três métodos

A Tabela 1 apresenta alguns dados que permitem comparar os três métodos fundamentados anteriormente.

Métodos	Triangulação	Telemetria por impulsos	Telemetria por comparação de fase	Interferometria
Distância [m]	$10^{-5} - 10^1$	$1 - 10^3$	$10^{-3} - 1.5$	$10^{-9} - 10^{-5}$
Fórmulas Essenciais	$AC = \frac{AB \cdot \sin \beta}{\sin(\alpha + \beta)}$	$r = \frac{N \cdot c}{2f_{clk}}$	$r = \frac{c(\Delta\varphi_0 - \Delta\varphi_0')}{4\pi(\nu_M - \nu_M')}$	$D \cong \frac{\Delta\phi\lambda^2}{4\pi\Delta\lambda}$
	$D = \frac{F \times E}{G}$			
Incerteza na medida (valores característicos)	$1 \mu m$	$5 m @ f_{clk} = 30 MHz$	$0,557 mm @ \nu_M = 30 MHz$	$0.15 \mu m$

Tabela 1 - Comparação dos três métodos básicos de medida

Abordando as vantagens e desvantagens de cada método, o método da triangulação tem como principais vantagens a simplicidade de medida (trigonometria simples) e o reduzido erro máximo de medida. Apresenta como principal desvantagem a medida de distâncias superiores a dezenas de metros, devido à geometria triangular. Por exemplo, no sensor representado na Figura 2, o detetor tem uma largura que limita a distância máxima e mínima a que o alvo se encontra.

O método da telemetria tem como principal vantagem as longas distâncias que consegue medir, tendo grande utilidade em levantamentos topográficos, por exemplo. Há uma diferença significativa entre os dois métodos estudados. O método de telemetria por impulsos tem um alcance desde as centenas de metros até aos milhares de metros, tendo como desvantagem o elevado erro de medida (5 metros na pior hipótese). Por outro lado, o método de telemetria por comparação de fase mede até 1,5 metros com resolução abaixo do centímetro, tendo a desvantagem de ser dispendioso devido ao elevado número de componentes requeridos.

O método da interferometria tem como principal vantagem a resolução até ao nanómetro que é essencial em missões espaciais. Apresenta como desvantagem o curto alcance das medições devido à impossibilidade física dos interferómetros.

Capítulo 4

4. Simulação das Experiências Propostas

Neste capítulo pretende-se explicar como foi feita a simulação das quatro experiências propostas. Para simular cada método de medida, utilizou-se o software *Wolfram Mathematica 10.3 Student Edition*.

Há fatores comuns aos quatro programas desenvolvidos. Utilizou-se uma matriz planar que representa o perfil do alvo, a posição do laser e a posição do detetor. Assim, cada movimento do laser e do detetor, cada movimento do impulso laser e cada alteração do esquema é simulado dentro da matriz. Ao utilizar uma matriz, torna-se mais simples simular cada método, facilitando a compreensão do modo de determinação de distâncias utilizado. Cada método utiliza uma matriz do tamanho que melhor se adapta ao esquema utilizado e ao intervalo de distâncias que mede.

De seguida serão detalhados os programas desenvolvidos para cada método de medida. Vão ser mostradas algumas linhas de código utilizadas na realização dos programas. O Apêndice 2 contém os quatro programas desenvolvidos na íntegra.

4.1. Método da Triangulação

Para a simulação da experiência baseada no método da triangulação, elaborou-se um programa que será detalhado neste subcapítulo. A simulação retrata a experiência realizada com uma diferença, na simulação é o bloco laser/detetor que se move em relação ao dado enquanto que na experiência é o dado que se move em relação ao bloco laser/detetor. Na teoria esta diferença não tem qualquer interferência nos resultados, uma vez que não há erros associados ao movimento dos vários elementos. No entanto, na experiência, introduz menos erros aos resultados movimentar apenas o dado do que movimentar o bloco laser/detetor pois tem de se garantir que a distância entre ambos seja constante.

Uma vez que estes modelos são iguais em termos teóricos e que a superfície do dado será desenhada numa matriz (através do programa detalhado de seguida), optou-se por fazer variar a posição do detetor e do laser na simulação em vez de mover toda a superfície do dado, por questões de representação na matriz.

A Figura 13 mostra o esquema da experiência e da simulação para se comprovar que a geometria é igual nos dois casos.

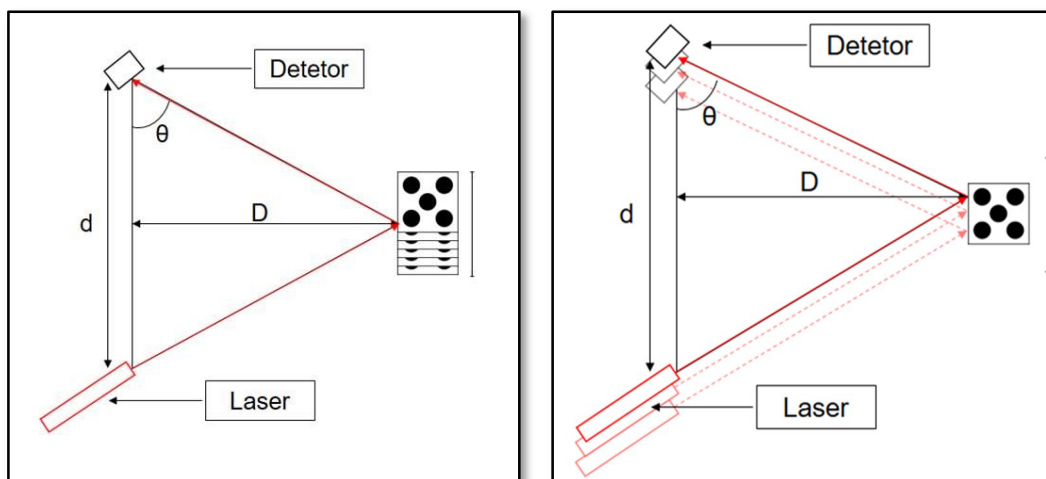


Figura 13 – a) Esquema da experiência b) Esquema da simulação

A Figura 14 mostra o fluxograma do programa dividido em 6 blocos que serão detalhados individualmente.

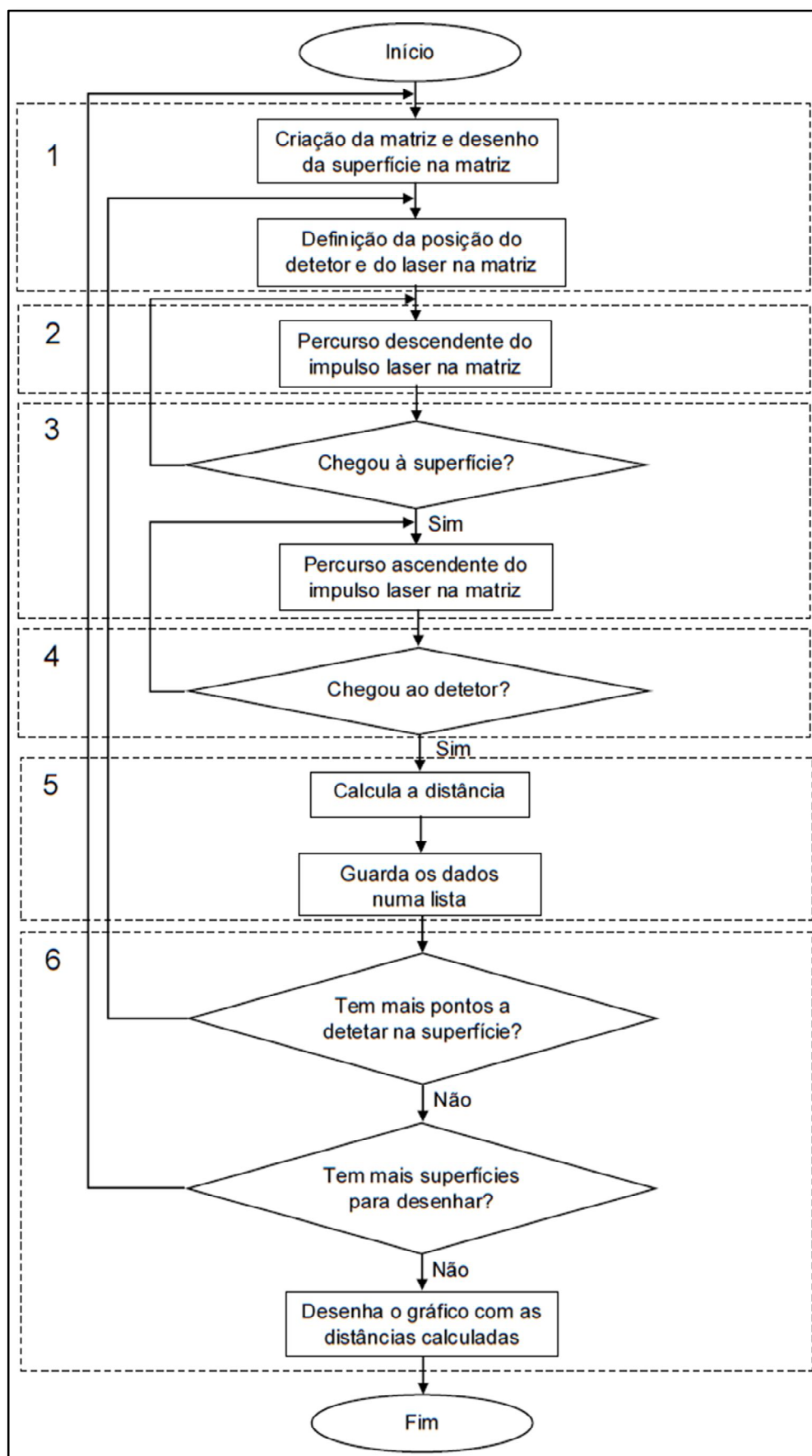


Figura 14 - Fluxograma do programa do método triangulação

Bloco 1

Utilizou-se a mesma superfície da experiência física que será detalhada no Capítulo 5 – a face 5 do dado. Para simular a face 5 do dado, introduziram-se no programa quatro superfícies de medida, transversais à face do dado, que correspondem a quatro padrões diferentes que podem ser observados na experiência:

- Uma que passa por 2 pintas (parte superior e inferior do dado) – Superfície 3;
- Uma que passa por 1 pinta (parte central do dado) – Superfície 4;
- Uma que não passa por nenhuma pinta (parte superior e inferior do dado, por cima e por baixo das 2 pintas) – Superfície 2;
- Uma que não passa no dado para simular o exterior acima e abaixo do mesmo – Superfície 1.

A Figura 15 mostra a face 5 do dado com as 4 superfícies acima referidas. Cada superfície corresponde a ter a coordenada z constante, variando a posição em x (variação horizontal do dado) e a posição em y (variação na profundidade do dado).

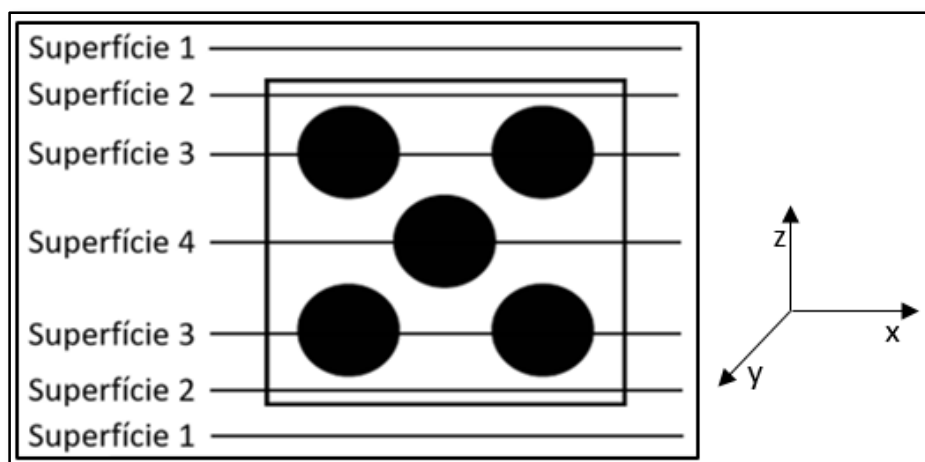


Figura 15 - Superfícies da face 5 do dado

Cada superfície foi introduzida numa matriz quadrangular 30x30 através de 2 ciclos For, como representado na Figura 16. Em cada posição destes 2 ciclos (1 ciclo para variar em y e 1 ciclo para variar em x) guarda-se numa lista (com o nome Lista) um quadrado da matriz e uma variável k . A variável k toma o valor 0 em que não existe objeto de medição e toma o valor 1 nos quadrados da matriz que correspondem a uma posição da superfície do objeto. As linhas de código utilizadas para a superfície que passa nas duas pintas do dado são as seguintes:

```

For[x1 = 0, x1 < dim, x1++,
|para cada
  For[y1 = 0, y1 < dim, y1++,
|para cada
  If[
|se
    ((x1 == 7 || x1 == 13 || x1 == 14 || x1 == 15 || x1 == 16 || x1 == 17 || x1 == 23) &&
      (y1 == 0 || y1 == 1 || y1 == 2 || y1 == 3 || y1 == 4 || y1 == 5 || y1 == 6 || y1 == 7 || y1 == 8 || y1 == 9 || y1 == 10 || y1 == 11)) ||
      ((x1 == 8 || x1 == 12 || x1 == 18 || x1 == 22) &&
        (y1 == 0 || y1 == 1 || y1 == 2 || y1 == 3 || y1 == 4 || y1 == 5 || y1 == 6 || y1 == 7 || y1 == 8 || y1 == 9 || y1 == 10)) ||
      ((x1 == 9 || x1 == 11 || x1 == 19 || x1 == 21) &&
        (y1 == 0 || y1 == 1 || y1 == 2 || y1 == 3 || y1 == 4 || y1 == 5 || y1 == 6 || y1 == 7 || y1 == 8 || y1 == 9)) ||
      ((x1 == 10 || x1 == 20) &&
        (y1 == 0 || y1 == 1 || y1 == 2 || y1 == 3 || y1 == 4 || y1 == 5 || y1 == 6 || y1 == 7 || y1 == 8))), k = 1, k = 0];
AppendTo[Lista, {x1, y1, i, k}];
|adiciona a
  i++;
];
];

```

A Figura 16 mostra as quatro superfícies desenhadas na matriz com o detetor (a verde) e o laser (a laranja) nas posições iniciais definidas no programa.

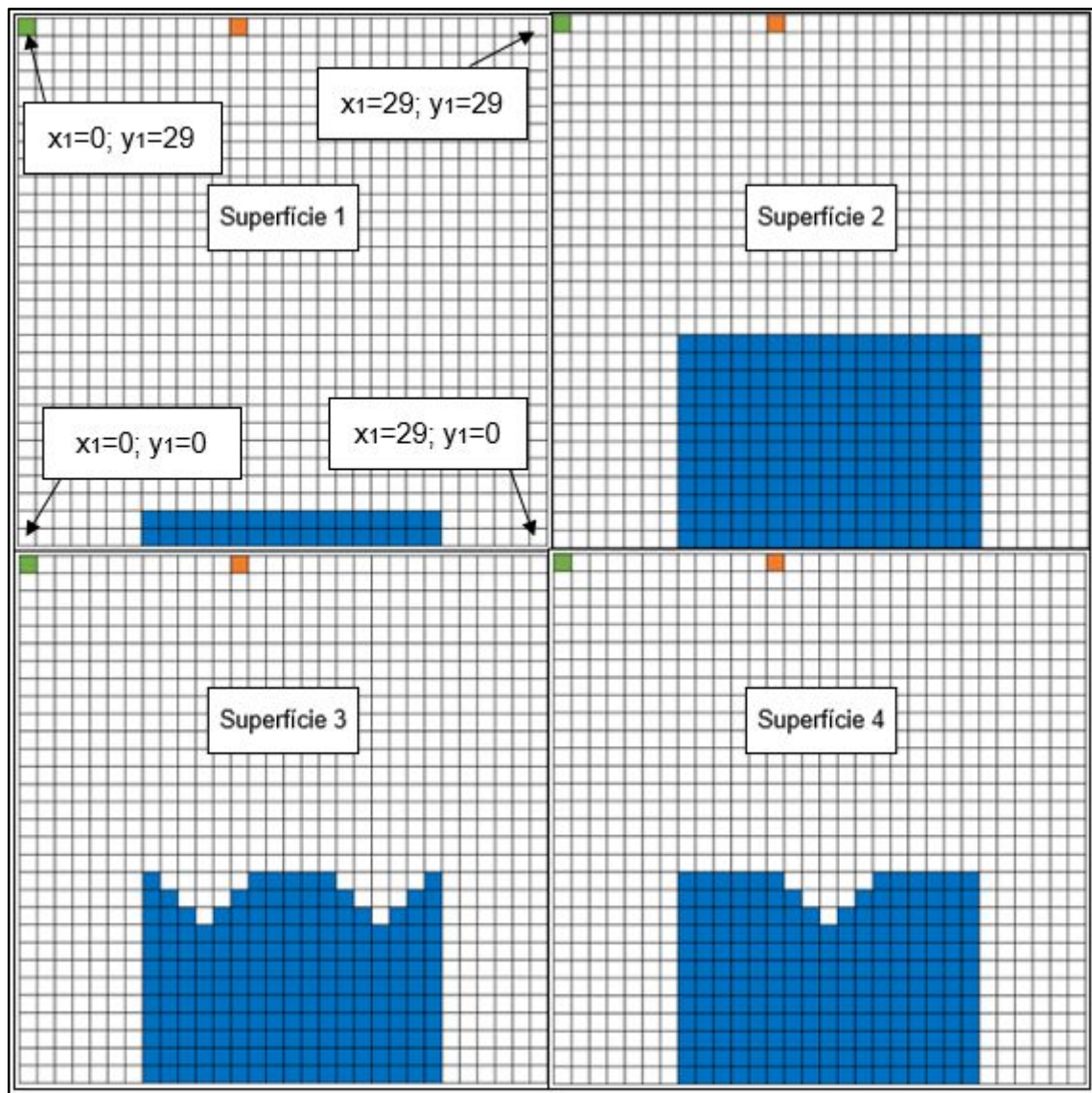


Figura 16 - Superfícies desenhadas na matriz com o laser e o detetor

Como se pode verificar no canto superior esquerdo da Figura 16, as variáveis x_1 e y_1 representam a variação em x e em y da matriz, respetivamente.

Cada ponto da matriz corresponde a um quadrado que tem 1 cm de lado. O laser e o detetor movem-se na mesma matriz, como já foi referido anteriormente. Neste programa, o laser e o detetor estão distanciados 12 quadrados da matriz. A Figura 17 mostra a posição do detetor (a verde) e do laser (a laranja) na matriz. Note-se que apenas se mostra uma parte da matriz para a figura ficar mais perceptível.

30	60	90	120	150	180	210	240	270	300	330	360	390	420	450	480	510	540	570	600
29	59	89	119	149	179	209	239	269	299	329	359	389	419	449	479	509	539	569	599
28	58	88	118	148	178	208	238	268	298	328	358	388	418	448	478	508	538	568	598
27	57	87	117	147	177	207	237	267	297	327	357	387	417	447	477	507	537	567	597
26	56	86	116	146	176	206	236	266	296	326	356	386	416	446	476	506	536	566	596
25	55	85	115	145	175	205	235	265	295	325	355	385	415	445	475	505	535	565	595
24	54	84	114	144	174	204	234	264	294	324	354	384	414	444	474	504	534	564	594
23	53	83	113	143	173	203	233	263	293	323	353	383	413	443	473	503	533	563	593
22	52	82	112	142	172	202	232	262	292	322	352	382	412	442	472	502	532	562	592

Figura 17 - Posição do detetor e do laser na matriz

Observando a Figura 13, verifica-se a relação trigonométrica da expressão (18):

$$\tan \theta = \frac{D}{d/2} = \frac{2D}{d} \quad (18)$$

Como a distância d é constante, para cada ângulo θ medido obtém-se a distância D pretendida. A expressão (19) mostra o cálculo efetuado para calcular esta distância.

$$D = \frac{d \cdot \tan \theta}{2} \quad (19)$$

Assim, tomando a expressão (19), a distância d é de 12 cm devido aos 12 quadrados que separam o detetor do laser em que cada quadrado tem 1 cm de lado como foi referido anteriormente.

As várias superfícies foram desenhadas na parte inferior da matriz. Em todas as superfícies o ponto mais elevado corresponde à ordenada 12, como se pode confirmar na Figura 16. Por exemplo, a superfície 2, que corresponde à zona do dado que não passa em nenhuma pinta ocupa todo o espaço da matriz desde a ordenada 1 até à ordenada 12. A Figura 18 mostra um exemplo de um impulso laser a viajar desde o laser (na ordenada 30) até à superfície (na ordenada 12) e de volta até ao detetor (na ordenada 30) para se determinar o ângulo θ .

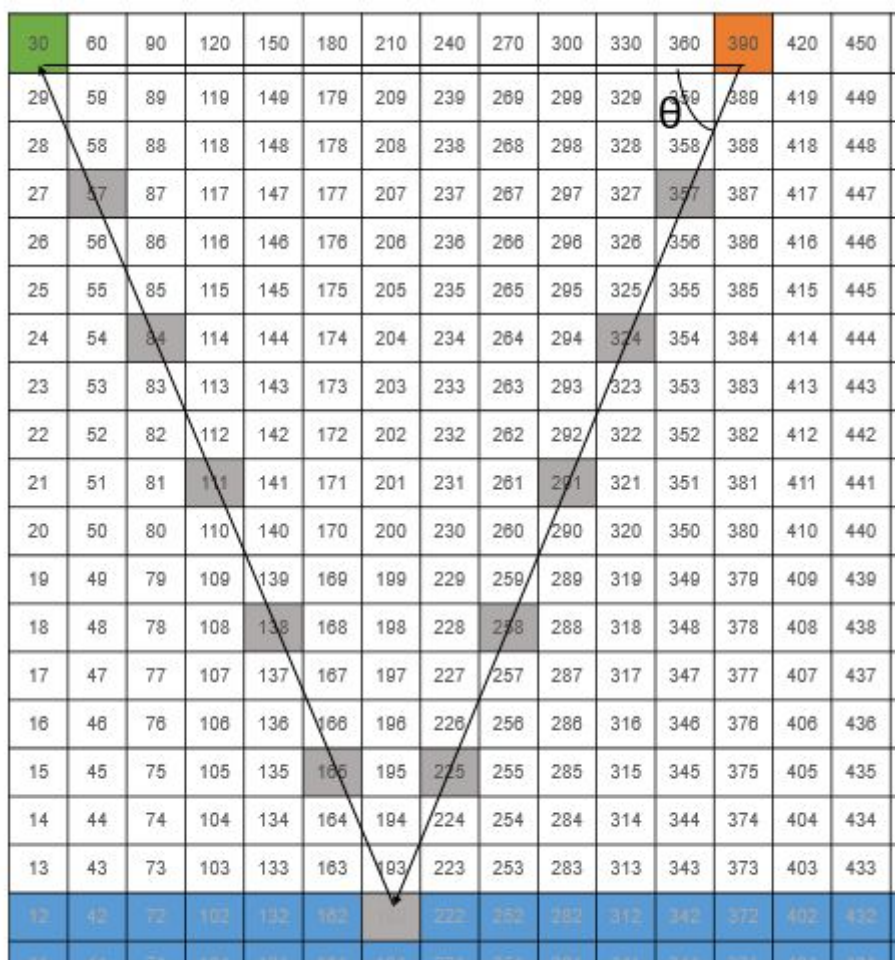


Figura 18 – Viagem de impulso laser

Como se pode observar na Figura 18, a movimentação do impulso laser na matriz corresponde a mover uma quadrícula para a esquerda e 3 quadrículas para baixo ou para cima. Esta movimentação implica um ângulo θ de $18,44^\circ$, ou seja, 0.32 radianos. Como se percebe pela Figura 18, o ângulo é determinado pelos quadrados que o impulso laser percorre. Assim, há uma limitação nos ângulos a utilizar. Este problema seria facilmente resolvido aumentando a dimensão da matriz. No entanto, neste caso em concreto, pretende-se uma simulação simples que demonstre o método da triangulação, o que é conseguido utilizando este ângulo e estas dimensões da matriz. Estes dados serão utilizados no cálculo da distância no bloco 5.

O conjunto laser/detetor move-se horizontalmente até o laser atingir o limite direito da matriz. Se depois de percorrer uma linha completa, a superfície não estiver toda detetada, o laser e o detetor movem-se verticalmente até encontrar todas as posições da superfície. A cada quadrícula que o laser e o detetor se movem para baixo, adiciona-se 1 cm (correspondente a 1 quadrado da matriz) ao cálculo da distância D . As linhas de código utilizadas para o movimento do conjunto laser/detetor são as seguintes:

```

For[a = 0, a ≤ dim - 13, a++,
|para cada
    det = dim + dim * a;
    For[d = 0, d ≤ 3, d++,
|para cada

```

Bloco 2

De seguida, inicia-se um ciclo que simula o percurso descendente do impulso laser. O percurso inicia-se no local do laser, ou seja, 12 posições à direita do detetor, com inclinação de $18,44^\circ$ no sentido descendente. Este movimento do impulso laser é efetuado através da subtração de um valor dentro da matriz que foi calculado de modo a corresponder ao ângulo mencionado. Assim, no sentido descendente efetua-se a subtração de (dimensão da matriz + 3), ou seja, de 33. No sentido ascendente subtrai-se (dimensão da matriz - 3), ou seja, 27. A Figura 19 exemplifica as subtrações efetuadas em cada sentido dentro da matriz utilizada (só estão representados as 12 linhas de baixo e as 12 colunas da esquerda para se perceber melhor a figura).

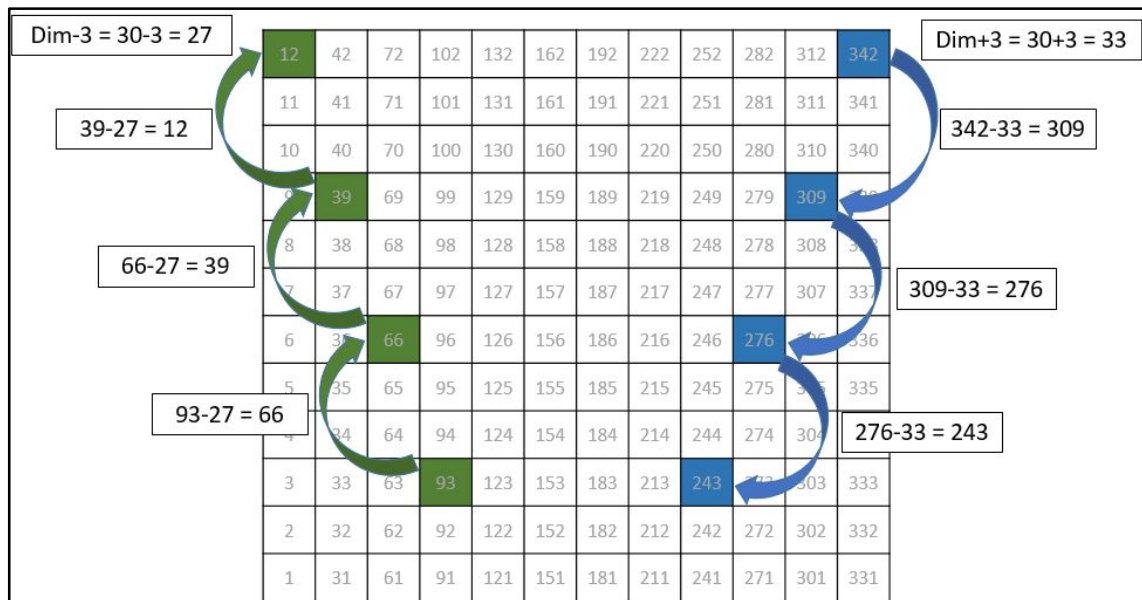


Figura 19 - Movimento na matriz

A linha de código para efetuar o movimento descendente do impulso laser é a seguinte:

```

For[b = (det + dim * 12) - d, b ≥ 1, b = b - (dim + 3),
|para cada

```

Bloco 3

Quando o impulso laser encontra um objeto (em programação, cada vez que o quadrado em que o impulso laser se encontra tem $k=1$), este deve alterar o sentido do movimento, ou seja, deve deixar de ir no sentido descendente e passar a ir no sentido ascendente em direção ao detetor. Sendo assim, o programa tem nesta fase uma instrução (If) que testa se o quadrado atual do impulso laser faz parte da superfície. Nesta fase, é definida uma variável tent que guardará o número de saltos que o

impulso laser faz no sentido ascendente até alcançar o detetor. As linhas de código utilizadas neste ciclo são as seguintes:

```
If[Lista[[b, 4]] == 1,  
se  
    c = b;  
    tent = 0;
```

Dentro desta instrução, no caso em que o impulso laser encontrou a superfície, inicia-se um ciclo (While) até que a posição do impulso chegue à posição do detetor. Dentro deste novo ciclo, a subtração da nova posição é diferente pois é feita no sentido ascendente do movimento. A cada movimentação do impulso laser no sentido ascendente a variável tent é incrementada. As linhas de código utilizadas neste ciclo são as seguintes:

```
While[c ≥ det - d,  
repete até que não retorne um valor verdadeiro  
    c = c - (dim - 3);  
    tent++;
```

Bloco 4

Para saber se o detetor foi alcançado, há dentro deste ciclo uma nova rotina If que é verdadeira se:

- a posição do impulso laser corresponder à posição do detetor;
- o número guardado em tent não ultrapassar o valor máximo. Este máximo tem a ver com o número de saltos máximos que o impulso laser pode fazer para atingir o detetor. Como esta determinação é feita através de subtrações, poderiam existir casos em que o impulso laser chegava perto do detetor sem atingir a sua posição (passava ao lado do detetor); nestes casos, a subtração continuava e poderia voltar a chegar à posição do detetor; se isto acontecesse, o If retornaria verdadeiro, o que resultaria num erro pois o detetor não “detetou” aquele impulso laser;
- a posição anterior do percurso descendente do impulso laser não fizer parte da superfície (o programa testa todos os casos, logo, se uma posição estiver nestas condições nunca vai ser detetada em termos reais pois o laser não penetra na superfície);
- a posição acima da posição atual do impulso laser não fizer parte da superfície (nestes casos também não faz sentido o ponto ser detetado pois o impulso laser não “atravessa” o objeto).

Bloco 5

Quando a rotina anterior (If) retorna positivo significa que aquele quadrado da superfície foi detetado. Quando isto acontece, o quadrado da superfície é guardado na lista Detetor. Esta lista guarda os seguintes resultados: número do quadrado detetado, superfície que está a ser detetada e a distância

calculada através da expressão (19). Enquanto as superfícies não forem todas detetadas, o programa volta a repetir desde o bloco 1 até ao bloco 5. As linhas de código usadas nesta fase são as seguintes:

```
If[c == det - d && tent ≤ dim / 3 && Lista2[[b + dim + 3, 4]] ≠ 1 && Lista2[[b + 1, 4]] ≠ 1,
|se
    quadrado2 = Lista2[[b, 3]];
    distancia2 = (6 / Tan[0.321839] + d);
    |tangente
    contador2++;
    AppendTo[Detetor, {quadrado2, 5, distancia2}];
```

Bloco 6

Quando as superfícies estão todas detetadas, o programa entra na sua fase final. Assim, criou-se outra lista DetetorFinal para guardar os quadrados em posições consecutivas (o primeiro quadrado detetado teria o número 1, o segundo o número 2 e assim sucessivamente) para efetuar o desenho do gráfico através do comando ContourPlot. As linhas de código utilizadas para guardar os quadrados no DetetorFinal e para efetuar o desenho do gráfico são as seguintes:

```
AppendTo[DetetorFinal, {contador2, 5, distancia2}];
|adiciona a
```

```
ListContourPlot[DetetorFinal, InterpolationOrder → 3]
|gráfico de contorno de uma lista de valores |ordem de interpolação
```

O Gráfico 1 mostra os resultados obtidos no programa, com a execução da instrução mencionada anteriormente.

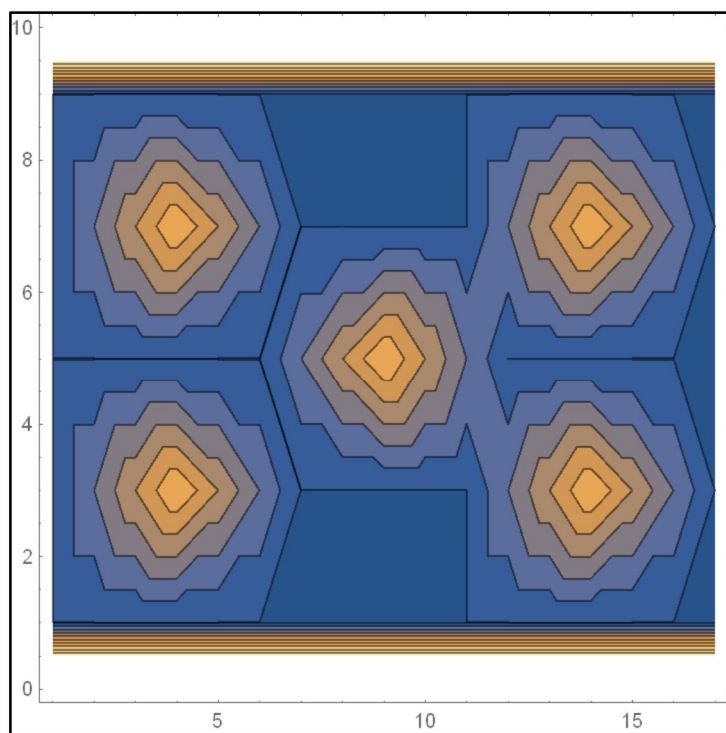


Gráfico 1 - Resultados obtidos na simulação do método da triangulação

Como se pode observar no Gráfico 1, as 5 pintas do dado são facilmente perceptíveis.

4.2. Método da Telemetria por Impulsos

Para simular o método da telemetria por impulsos, considerou-se que o laser e o detetor estavam incorporados no mesmo local e, aquando do início da emissão do impulso laser, inicia-se no detetor a contagem do tempo até à receção desse mesmo impulso. A contagem do tempo é feita considerando que há um relógio com frequência de 50 MHz a atuar num contador que permite essa frequência de relógio. No subcapítulo 5.2. será apresentado um circuito real onde a frequência de contagem é diferente, mas o princípio de funcionamento é semelhante ao simulado neste programa.

Com a frequência de relógio de 50 MHz e recorrendo à expressão (8), obtém-se um T de 20 ns. Assim, através da expressão (9) obtém-se uma $2D_{inc}$ de 6 m, ou seja, uma incerteza na medida máxima de 3 m (estes cálculos são semelhantes aos efetuados no subcapítulo 3.2.). Para desenvolver este programa, considerou-se que a cada 6 m percorridos pelo impulso laser, ou seja, passados 20 ns, um contador incorporado no detetor incrementava 1 à contagem para obter o valor de N e assim calcular a distância pela expressão (7).

O princípio do esquema utilizado nesta simulação é semelhante ao representado na Figura 10. Na simulação, o esquema está simplificado, pois o início na contagem, representado na Figura 10, dá-se no instante em que o impulso laser inicia o seu percurso.

A Figura 20 mostra o fluxograma do programa dividido em 5 blocos que serão detalhados individualmente.

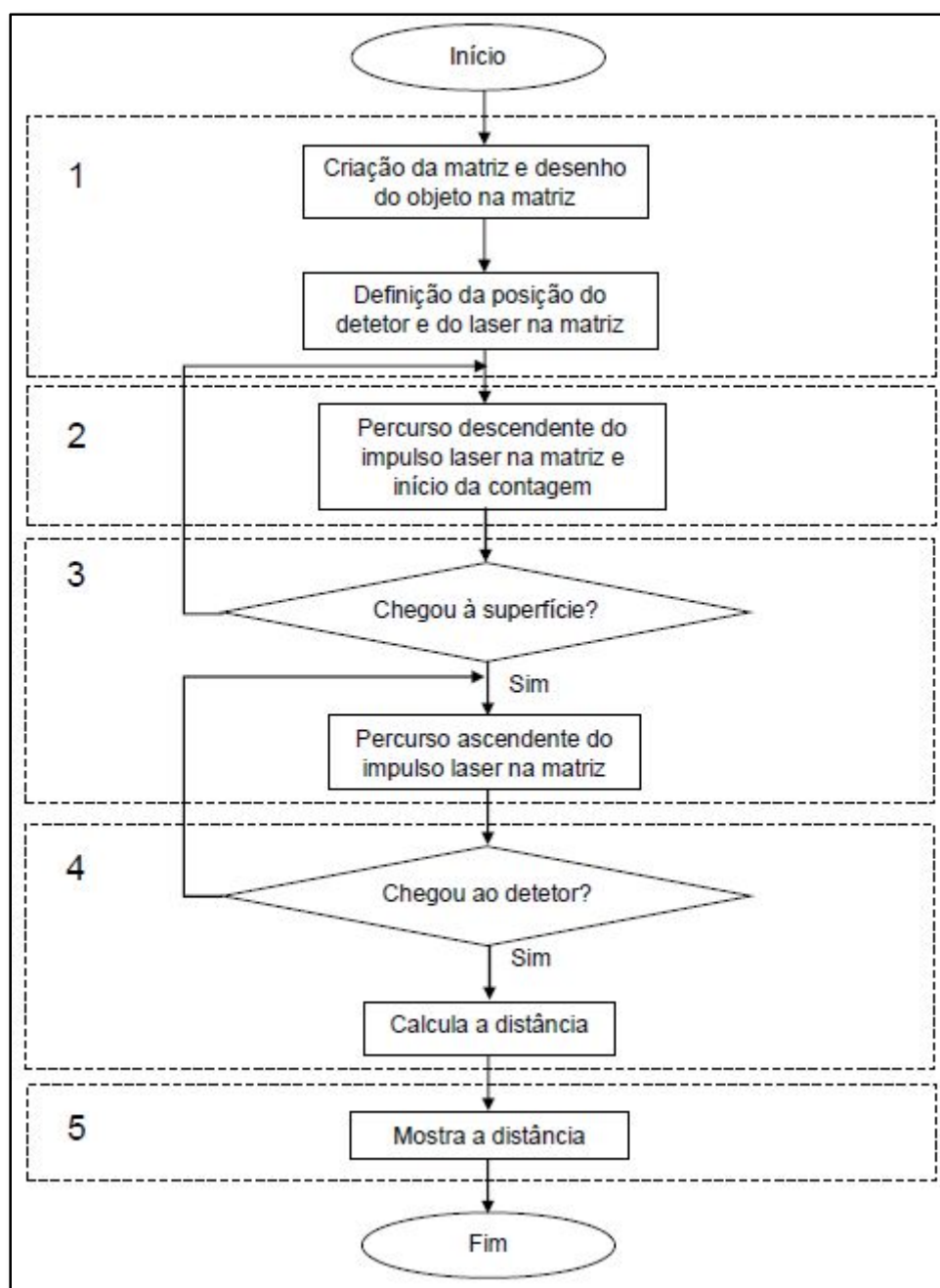


Figura 20 - Fluxograma do programa do método telemetria por impulsos

Bloco 1

O objeto foi introduzido numa matriz retangular 5x50 através de 2 ciclos For. Em cada posição destes 2 ciclos, tal como no programa descrito no subcapítulo 4.1., guarda-se numa lista (com o nome Lista) um quadrado da matriz e uma variável k que toma o valor 1 no quadrado correspondente ao objeto e 0 nos restantes quadrados. A Figura 21 mostra a posição do laser/detetor (laranja e verde) e do objeto (azul) na matriz. Note-se que apenas se representa parte da matriz para se entender melhor a figura.

50	100	150	200	300
49	99	149	199	249
48	98	148	198	248
...				
3	53	103	153	203
2	52	102	152	202
1	51	101	151	201

Figura 21 - Representação do laser/detetor e do objeto na matriz

Como se pode observar na Figura 21, o laser e o detetor encontram-se no quadrado 150 e o objeto encontra-se no quadrado 101. O impulso laser percorre verticalmente a matriz até ao objeto e volta pelo mesmo percurso até ao detetor. Cada quadrado da matriz tem 1 m de lado. Assim, o objeto encontra-se a 50 m do laser e do detetor, pelo que o impulso laser percorre 100 m no total. As linhas de código utilizadas nesta fase do programa são as seguintes:

```

For[x1 = 0, x1 < 5, x1++,
|para cada
  For[y1 = 0, y1 < 50, y1++,
|para cada
  If[ ((x1 == 2) && (y1 == 0)), k = 1, k = 0];
|se
  AppendTo[List, {x1, y1, i, k}];
|adiciona a
  i++;
];
];
det = 150;

```

Posição do laser/detetor

Bloco 2

A partir do quadrado 150 é enviado um impulso laser vertical na direção do objeto que é recebido segundo a mesma direção pois o laser e o detetor estão no mesmo quadrado. A deteção funciona da mesma forma que a do programa anterior, ou seja, quando a superfície é atingida, o impulso laser inverte o sentido do movimento. Em termos de programação o movimento do impulso laser significa andar uma posição da matriz para baixo quando o impulso vai do laser para o objeto e andar uma posição da matriz para cima quando o impulso vai do objeto para o detetor.

Para simular a contagem efetuada, criou-se uma variável 'a' inicializada com o número 6 que representa os metros que o impulso laser tem de efetuar para a contagem ser incrementada. Esta variável é decrementada a cada quadrado percorrido pelo impulso laser. Quando esta chega a 0 significa que o impulso laser percorreu 6 m. Há uma rotina que, quando a variável 'a' chega a 0, incrementa uma outra variável 'n' que representa o resultado da contagem. Quando a variável 'n' é incrementada, a variável 'a' regressa novamente a 6 para voltar a ser decrementada e assim sucessivamente até o impulso laser chegar ao detetor e parar a contagem. A Figura 22 mostra a movimentação do impulso laser com a atualização das variáveis 'a' e 'n' durante o percurso. Mais uma vez, apenas se mostra parte da matriz para se entender melhor a figura.

n = 0	150	a = 6
n = 0	149	a = 5
n = 0	148	a = 4
n = 0	147	a = 3
n = 0	146	a = 2
n = 0	145	a = 1
n = 1	144	a = 0 → a = 6
n = 1	143	a = 5
n = 1	142	a = 4
n = 1	141	a = 3
n = 1	140	a = 2
n = 1	139	a = 1
n = 2	138	a = 0 → a = 6

Figura 22 – Atualização das variáveis 'a' e 'n' durante o percurso do impulso laser

As linhas de código utilizadas neste ciclo são as seguintes:

```
For[b = det, b ≥ 1, b = b - 1,
para cada
    a--;
    If[a == 0, a = 6; n++;];
se
```

Bloco 3

Para saber se o objeto foi detetado, há uma rotina que testa se a variável k da Lista se encontra a 1. Caso este teste dê positivo, significa que o objeto foi detetado e o movimento do impulso laser inverte o seu sentido. Nesta fase, há a necessidade de mudar o nome às variáveis 'a' e 'n' para 'd' e

'm', respetivamente, porque se inicia um ciclo diferente. Nos ciclos anteriores foi utilizada uma variável 'b' para simular o movimento descendente do impulso laser. Esta também foi mudada para variável 'c', como se vai verificar de seguida. As linhas de código utilizadas nesta fase do programa são as seguintes:

```
If[Lista[[b, 4]] == 1,  
|se  
  c = b;  
  d = a;  
  m = n;  
  While[c < det,  
  |repete até que não retorne um valor verdadeiro  
    c = c + 1;  
    d --;  
    If[d == 0, d = 6; m++;];  
  |se
```

Como se pode observar nas linhas de código apresentadas, a variável 'd' continua a ser decrementada à semelhança da variável 'a'.

Bloco 4

Quando o impulso laser atinge o detetor, é guardado na lista Detetor o quadrado detetado (quadrado 101) e calculada a distância através da expressão (7). As linhas de código utilizadas são as seguintes:

```
If[c == det,  
|se  
  quadrado = Lista[[b, 3]];  
  distancia = 300 000 000 * m / (2 * 50 000 000);  
  AppendTo[Detetor, {quadrado, distancia}];  
|adiciona a
```

Bloco 5

Por último mostra-se o resultado da lista Detetor. A linha de código é mostrada de seguida, com o respetivo resultado:

```
Detetor  
Out[971]= {{101, 48}}
```

Observando o resultado, verifica-se que foi detetado o quadrado 101, como era pretendido. A distância calculada foi de 48 m. O objeto estava a 50 m de distância do detetor e do laser. Como se pode verificar, obteve-se um erro nesta medida de 2 m que está dentro dos 3 m de erro máximo referido anteriormente.

4.3. Método da Telemetria por Comparação de Fase

Para simular o método da telemetria por comparação de fase elaborou-se um programa onde se utilizou um objeto situado a 50 cm do detetor. Neste programa, a distância entre o laser e o detetor é muito inferior à distância entre ambos e o objeto, simulando um sensor que tem o laser e o detetor incorporados. A Figura 23 mostra um fluxograma do programa dividido em 5 blocos.

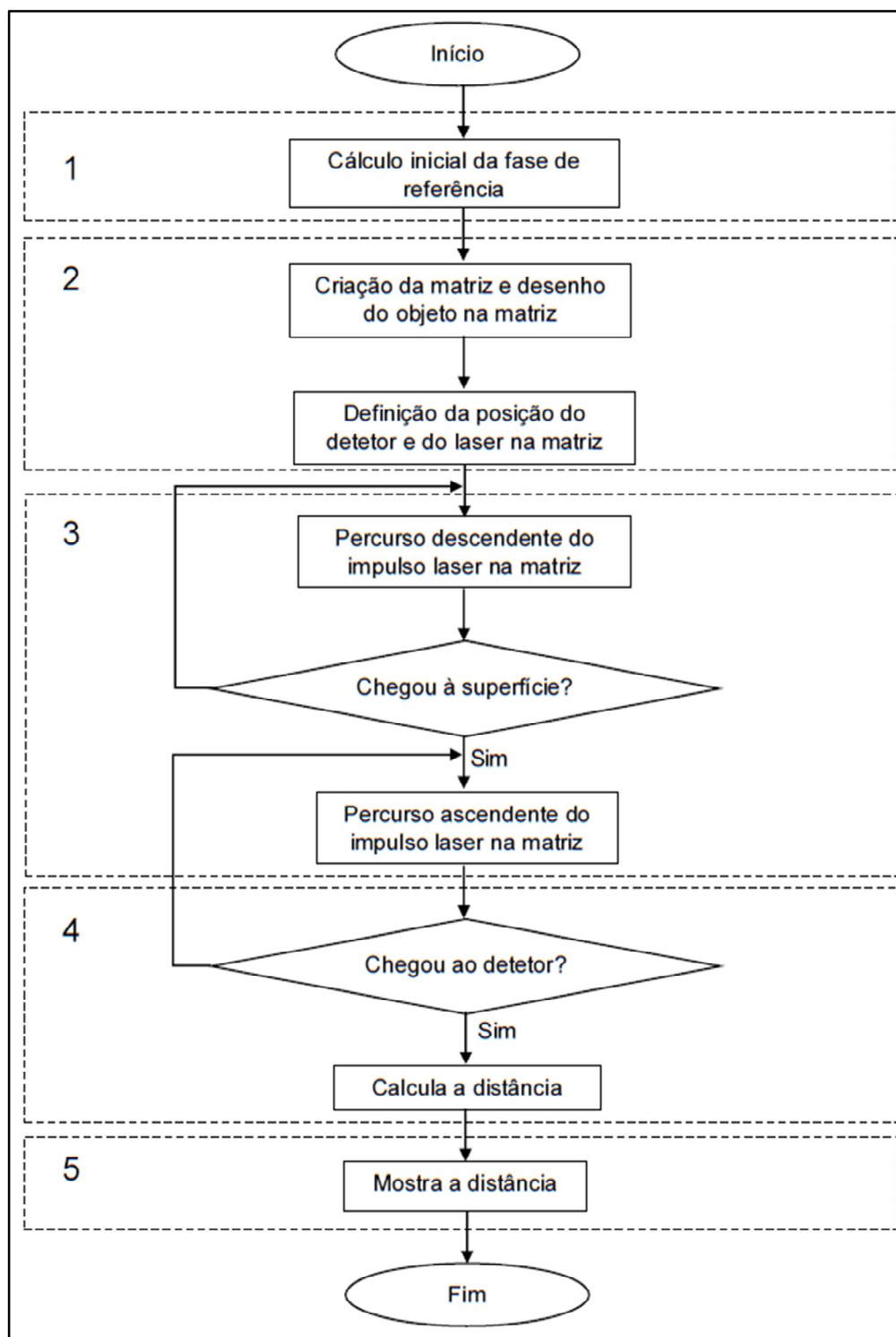


Figura 23 - Fluxograma do programa de telemetria por comparação de fase

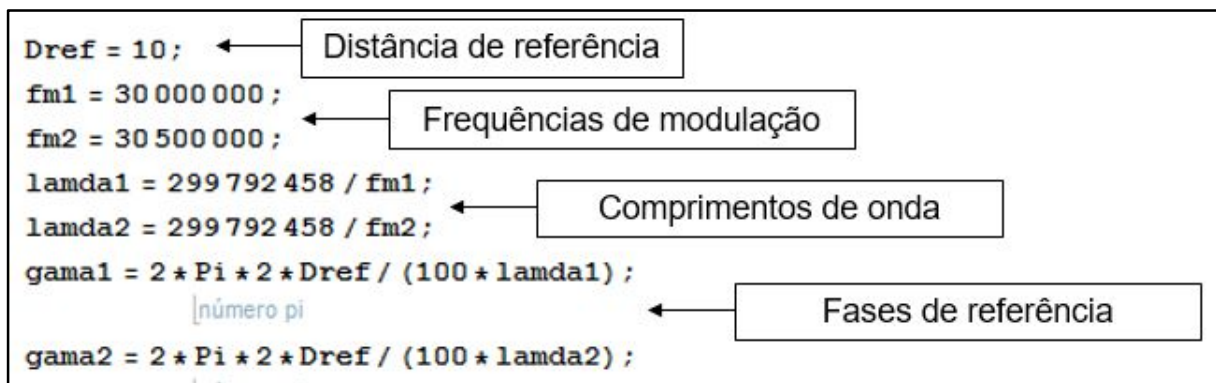
Bloco 1

Este método consiste na comparação de fase entre o impulso laser que vem refletido do objeto e um impulso de referência. Neste programa, o impulso de referência é obtido através da reflexão do impulso laser numa superfície de referência que se encontra a 10 cm do detetor.

Como foi referido no subcapítulo 3.3., neste método utilizam-se duas frequências de modulação próximas para efetuar o cálculo da distância. Assim, no programa definiram-se as frequências de modulação de 30 MHz e 30.5 MHz que resultam num comprimento de onda de cerca de 10 m (este cálculo consiste na divisão entre a velocidade da luz e a frequência; note-se que no programa este cálculo é feito com precisão, pois o valor utilizado para a velocidade da luz é de 299792458 m/s), em que o valor de k não se altera, permitindo utilizar a expressão (15). O cálculo da fase do impulso de referência é feito antes de todos os ciclos, pois abrange todo o programa. Sabendo que a superfície de referência se encontra a 10 cm, a distância de referência é o dobro (ida e volta do impulso), pelo que a fase do impulso de referência é calculada através da expressão (20):

$$\varphi = \frac{2\pi \cdot d_{ref}}{\lambda} \quad (20)$$

As linhas de código utilizadas nesta fase são as seguintes:



Bloco 2

A criação da matriz, o desenho do objeto e a definição da posição do laser e do detetor utilizam exatamente as mesmas linhas de código do programa simulador do método da telemetria por impulsos, pelo que, observando a Figura 21, temos a posição do laser/detetor e do objeto.

Bloco 3

O percurso do impulso laser no sentido descendente funciona de igual forma ao programa da telemetria por impulsos, ou seja, a partir do quadrado 150 é enviado um impulso laser vertical na direção do objeto e refletido na mesma direção, mas em sentido contrário, para o detetor. A deteção funciona da mesma forma que a do programa anterior, ou seja, quando o objeto é atingido, o impulso laser inverte o sentido do movimento. Em termos de programação acontece exatamente o mesmo, ou seja, o movimento do impulso laser significa andar uma posição da matriz para baixo quando o impulso vai

do laser para o objeto e andar uma posição da matriz para cima quando o impulso vai do objeto para o detetor.

No software utilizado não é possível determinar a fase de uma onda. Assim, de modo a solucionar esta limitação, mediu-se a distância percorrida pelo impulso laser e calculou-se a fase a partir dessa distância através da expressão (20) em que a d_{ref} foi substituída pela distância determinada. Para determinar esta distância, utilizou-se uma variável saltos que foi incrementada a cada movimento do impulso laser na matriz. Como cada quadrado corresponde a 1 cm, o valor final da variável saltos é igual à distância percorrida.

A detecção do objeto e a inversão do sentido do impulso laser são exatamente iguais às do programa da telemetria por impulsos. As linhas de código utilizadas neste bloco são as seguintes:

```
For[b = det, b ≥ 1, b = b - 1,
para cada
    saltos++;
    If[Lista[[b, 4]] == 1,
    se
        c = b;
        While[c ≤ det,
        repete até que não retorne um valor verdadeiro
            c = c + 1;
            saltos++;
```

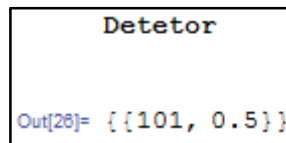
Bloco 4

Quando o impulso laser atinge o detetor, é guardado na lista Detetor o quadrado detetado (quadrado 101) e calculada a distância. A distância que se pretende medir é a soma entre os 10 cm de referência e a distância calculada através da expressão (15). As variáveis fase1 e fase2 calcularam a diferença de fase para a frequência de modulação de 30 MHz e 30.5 MHz, respetivamente. Tendo as diferenças de fase e as duas frequências de modulação, a variável R guardou o cálculo da distância. O quadrado detetado e a distância calculada foram guardados na lista Detetor. As linhas de código utilizadas para este bloco são as seguintes:

```
If[c == det,
se
    quadrado = Lista[[b, 3]];
    gama11 = 2 * Pi * (saltos) / (100 * lamda1);
    gama22 = 2 * Pi * (saltos) / (100 * lamda2);
    fase1 = gama11 - gama1;
    fase2 = gama22 - gama2;
    R = 299 792 458 * (fase1 - fase2) / (4 * Pi * (fm1 - fm2));
    distancia = Dref / 100 + R;
```

Bloco 5

Por último mostra-se o resultado da lista Detetor. A linha de código é mostrada de seguida, com o respetivo resultado:



The image shows a Mathematica interface with a box titled "Detetor". Below the title, the output is displayed as `Out[26]= {{101, 0.5}}`.

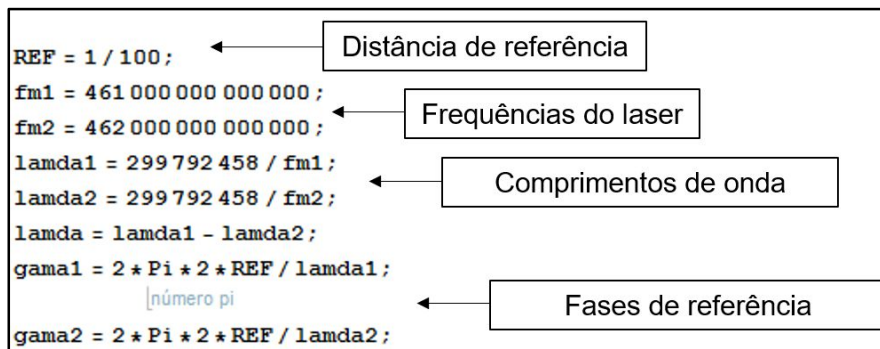
Como se pode observar, o quadrado 101 foi detetado com uma distância de 0.5 m, ou seja, 50 cm. O objeto foi colocado a 50 cm do detetor. Assim, este método apresentou um resultado sem qualquer erro de medida. Como foi referido no capítulo 3.3., o erro de medida associado a este método ocorre devido a um erro na determinação da diferença de fase. Neste programa, esse erro não acontece porque a comparação de fase é calculada através de fórmulas em vez de ser medida num comparador de fase físico.

4.4. Método da Interferometria

Para simular o método da interferometria elaborou-se um programa no qual se utilizou um objeto situado a 10005 μm do detetor. Simulando que estamos na presença de um interferómetro de *Michelson*, o impulso laser divide-se em dois impulsos, em que um sai em direção ao alvo por um braço e o outro sai em direção a uma referência pelo outro braço. O esquema da simulação é o mesmo da Figura 12 do capítulo 3.4. O fluxograma deste programa é exatamente igual ao da Figura 23, que representa o programa da telemetria por comparação de fase. Ainda assim, os blocos têm outras linhas de código, pelo que serão detalhados de seguida.

Bloco 1

Neste método, como se pode observar no subcapítulo 3.4., são necessários dois comprimentos de onda próximos para obter o $\Delta\lambda$ e assim efetuar os cálculos da distância. No caso experimental, este $\Delta\lambda$ é determinado através de uma alteração na corrente de injeção do laser, como foi referido anteriormente. No programa optou-se por definir duas frequências próximas para simular esse efeito. Como tal, utilizaram-se as frequências de 461 THz e de 462 THz, que têm comprimentos de onda de 0.650309 μm e de 0.648901 μm , respetivamente. Ambos os comprimentos de onda estão dentro do espetro da cor vermelha (0.62 μm a 0.75 μm). No programa considerou-se que a referência estava a 1 cm do detetor e calculou-se a fase de referência para as duas frequências utilizadas. As linhas de código para efetuar estes cálculos iniciais são as seguintes:



Bloco 2

O método da interferometria é utilizado para medir distâncias entre os nanómetros e as dezenas de micrómetros. Como tal, utilizou-se uma matriz quadrangular de 5x5 onde cada quadrado tem 1 µm de lado. No programa colocou-se o objeto a 10005 µm do detetor. Como a referência se encontra a 1 cm do detetor e se pretende determinar uma distância que adiciona ao valor de referência 5 µm (cerca de 4 grandezas inferior), a matriz desenhada apenas contempla o esquema a partir da referência. Como é facilmente perceptível, para representar a referência e a distância adicional, teríamos de ter 10005 quadrados em cada coluna da matriz, o que dificultaria a simulação. Assim, considerou-se que o impulso laser percorre 1 cm (valor igual ao da referência) e entra na matriz pelo quadrado 15 como será observável na figura seguinte. Quando o impulso laser é refletido pelo objeto, passa novamente pelo quadrado 15 onde se considera detetado embora tenha de percorrer mais 1 cm até ao detetor.

A Figura 24 mostra o esquema utilizado com a entrada do impulso laser na matriz (a laranja e verde) e o objeto (azul). Note-se que a Figura 24 não está à escala.

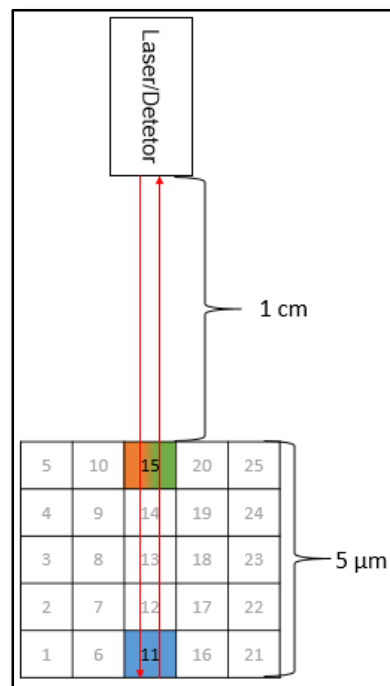


Figura 24 - Esquema com matriz do método da interferometria

Como se pode observar, o impulso laser entra no quadrado 15 e o objeto ocupa o quadrado 11. À semelhança dos programas anteriores, a matriz é criada guardando valores na lista denominada Lista em que o objeto tem a variável k a 1 e os restantes quadrados têm k a 0. As linhas de código utilizadas para a criação da matriz e a definição das posições do laser, detetor e objeto são as seguintes:

```
For[x1 = 0, x1 < 5, x1++,  
|para cada  
  For[y1 = 0, y1 < 5, y1++,  
  |para cada  
    If[(x1 == 2) && (y1 == 0), k = 1, k = 0];  
  |se  
    AppendTo[Lista, {x1, y1, i, k}];  
  |adiciona a  
    i++;  
  ];  
];  
det = 15;
```

Bloco 3

O percurso do impulso laser no sentido da referência não é simulado na matriz porque já foi simulado no bloco 1. Por outro lado, o percurso do impulso laser no sentido do objeto é simulado na matriz. Este inicia-se no quadrado 15 em direção ao objeto (depois de percorrer 1 cm como já foi referido). Foi criada uma variável saltos que é incrementada a cada movimento do impulso laser para conseguir determinar a distância e assim calcular a fase do impulso laser, exatamente o procedimento feito no programa da telemetria por comparação de fase. Mais uma vez, quando o objeto é detetado, o impulso laser inverte o sentido do movimento. As linhas de código utilizadas nesta rotina são as seguintes:

```
saltos = 0;  
For[b = det, b ≥ 1, b = b - 1,  
|para cada  
  saltos++;  
  If[Lista[[b, 4]] == 1,  
  |se  
    c = b;  
    saltos1 = saltos;  
    While[c ≤ det,  
    |repete até que não retorne um valor verdadeiro  
      c = c + 1;  
      saltos1++;
```

Bloco 4

Quando o impulso laser atinge o detetor (na realidade só atinge novamente o quadrado 15, mas considera-se que, ao passar naquele quadrado, chega ao detetor 1 cm depois), é guardado na lista Detetor o quadrado detetado (quadrado 11) e calculada a distância. A distância que se pretende medir é a soma entre a distância de referência (1 cm) e a distância calculada através da expressão (17). As variáveis fase1 e fase2 calcularam a diferença de fase para a frequência de modulação de 30 THz e 30.5 THz, respetivamente. Tendo as diferenças de fase, o comprimento de onda e a diferença entre os comprimentos de onda das duas frequências utilizadas, a variável R guardou o cálculo da distância. O quadrado detetado e a distância calculada foram, à semelhança dos programas anteriores, guardados na lista Detetor. As linhas de código utilizadas para este bloco são as seguintes:

```
If[c == det && Lista[[b + 1, 4]] != 1,
  se
    quadrado = Lista[[b, 3]];
    gama11 = 2 * Pi * (2 * REF + (saltos1 + 1) / 1 000 000) / lamda1;
    gama22 = 2 * Pi * (2 * REF + (saltos1 + 1) / 1 000 000) / lamda2;
    fase1 = gama11 - gama1;
    fase2 = gama22 - gama2;
    R = (fase2 - fase1) * lamda1 * lamda1 / (4 * Pi * lamda);
    distancia = REF + R;
```

Bloco 5

Por último mostra-se o resultado da lista Detetor. A linha de código, com o respetivo resultado, é a seguinte:

```
Detetor
Out[30]= {{11, 0.0100050108}}
```

Como se pode observar, o quadrado 11 é detetado, como era suposto. A distância a que o objeto se encontra do detetor é de 10005 μm . A distância calculada foi de 10005.0108 μm . O erro de 0,0108 μm não tem a ver com o método da interferometria, mas sim com aproximações feitas pelo software durante o processo de cálculo. Os erros neste método verificam-se quando há alterações de comprimento de onda provocadas por alterações na corrente de injeção do laser e/ou por alterações de temperatura. Estes fatores não se verificam no software, pelo que os erros neste programa não são expectáveis.

Capítulo 5

5. Experiências Propostas

Este capítulo consiste na descrição das experiências propostas para cada método de medida estudado nos capítulos anteriores. Em cada método apresenta-se a montagem experimental utilizada e os resultados obtidos.

5.1. Método da Triangulação

Inicialmente efetuou-se uma experiência para verificar se as distâncias calculadas através da geometria triangular correspondiam às distâncias reais a que o objeto se encontra. A Figura 25 mostra a experiência efetuada com a geometria desenhada de acordo com a Figura 13.

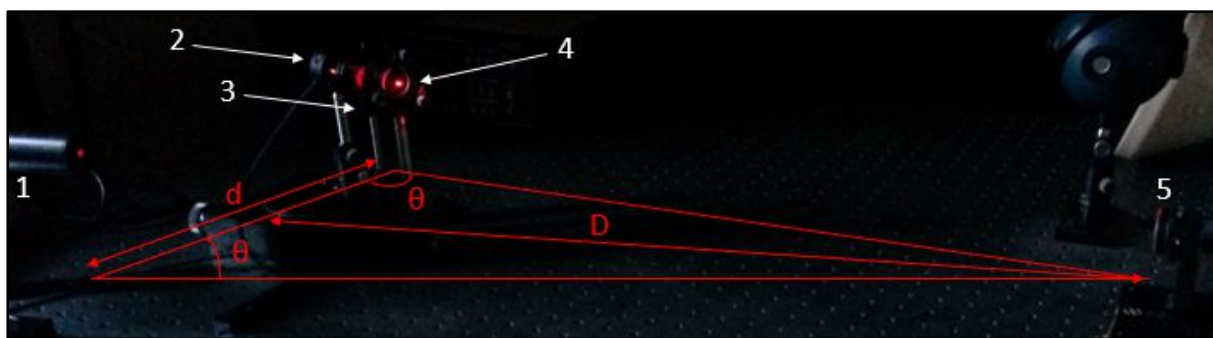


Figura 25 - Representação esquemática da geometria da experiência

A distância entre o laser (1) e o detetor (2), representada por d , é de 28 cm. Para direcionar o impulso laser refletido para o detetor, utilizou-se uma lente (4) seguida de um diafragma (3). Assim, assegura-se que só o impulso laser refletido atinge o detetor, eliminando reflexões residuais ou a luz natural do laboratório (para conseguir ler os resultados deixou-se uma janela ligeiramente aberta). O objeto utilizado nesta experiência é um espelho (5) pois é um excelente refletor e o objetivo da experiência é apenas confirmar se as distâncias calculadas correspondem às distâncias reais. Assim, colocou-se o espelho equidistante do laser e do detetor de modo a que D tivesse 70 cm. O espelho colocou-se a esta distância recorrendo a uma régua com precisão de 0,5 mm. Através da expressão (19), calculou-se o ângulo θ necessário para que o espelho fosse detetado à distância D . Desta operação resultou um θ de 74.36° .

De seguida, colocou-se o laser a apontar para o centro do espelho, ou seja, com uma inclinação lateral de aproximadamente 74.36° . Rodou-se o detetor num suporte móvel rotativo com escala angular analógica com precisão até $0,005^\circ$ até ter uma inclinação de 74.36° . Assim, tanto o laser como o detetor tinham um θ de 74.36° . Para verificar o objetivo da experiência, observou-se a potência recebida no detetor quando o espelho se encontrava a 70 cm. Obteve-se uma potência de 1.503 mW. Para

confirmar se esta era a potência máxima que o detetor poderia receber, colocou-se o espelho 1 cm mais próximo e 1 cm mais afastado, ou seja, a 69 cm e a 71 cm, respetivamente. Em ambos os cenários observou-se uma potência inferior a 1.503 mW, confirmando que a distância calculada é igual à distância real do espelho.

Para comprovar os dados obtidos, efetuou-se exatamente o mesmo procedimento com uma distância D de 50 cm. Neste caso, o ângulo θ obtido foi de 78.69° . Depois de colocar o laser e o detetor com as inclinações certas, observou-se a potência com o espelho a 50 cm e obteve-se uma potência de 1.483 mW. Colocou-se novamente o espelho 1 cm mais próximo e 1 cm mais afastado e obtiveram-se potências inferiores a 1.483 mW. Assim, comprovou-se que a montagem experimental efetuada permite medidas de distância precisas utilizando o método da triangulação.

A segunda experiência proposta consiste na utilização do método da triangulação para detetar a superfície de um dado, tal como a simulação efetuada no subcapítulo 4.1. Neste subcapítulo pretende-se descrever a experiência efetuada, mostrando a montagem experimental e os respetivos materiais utilizados, os resultados obtidos e uma enumeração de erros experimentais passíveis de influenciar as medições.

5.1.1.Montagem Experimental

Nesta montagem experimental utilizaram-se os seguintes materiais:

1. Laser vermelho de hélio-néon JDS Uniphase 1100 Series modelo 1101/P;
2. Medidor de potência laser Newport Model 815;
3. Detetor Model 818-sl;
4. Dado;
5. Suporte rotativo para afixar o detetor à mesa de ótica da Newport;
6. Suporte móvel para afixar o dado à mesa de ótica da Newport;
7. Óculos de proteção;

A Figura 26 apresenta uma fotografia da montagem experimental utilizada. Note-se que o detetor aparece na Figura 26 sem o diafragma e a lente para se poder observar a sua imagem. No entanto, na experiência efetuada utilizou-se a lente e o diafragma com o mesmo objetivo da experiência inicial retratada na Figura 25.

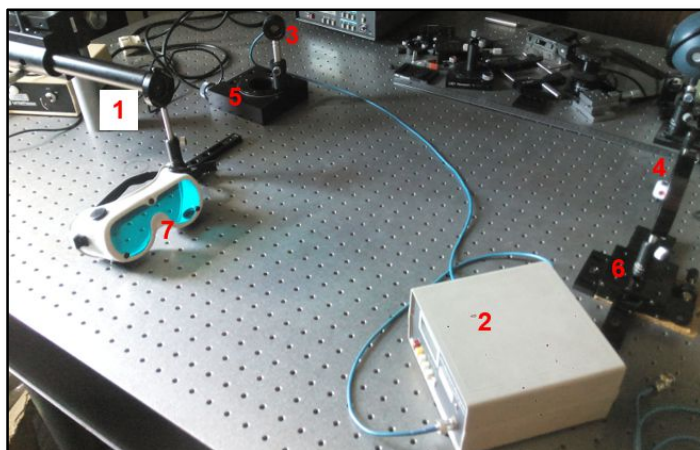


Figura 26 - Montagem experimental para o método da triangulação

Colocou-se o dado sobre um suporte móvel para permitir a sua movimentação e utilizou-se a face do dado correspondente ao número 5 como superfície a detetar. A experiência consistiu no varrimento do dado através da movimentação do suporte com um parafuso micrométrico (os erros inerentes a este processo serão abordados no subcapítulo 5.1.3.). Como a experiência exige uma distância constante entre o detetor e o laser (distância d na Figura 13), optou-se por variar a posição do dado e manter constantes a posição do detetor e do laser. Com o objetivo de medir o ângulo entre o plano detetor/laser e o plano detetor/dado (ângulo θ na Figura 13), em cada posição do dado movimentou-se o laser e o detetor num suporte móvel rotativo com uma escala angular analógica (útil para a medição de ângulos), até atingir o máximo de potência. Note-se que o laser e o detetor movem-se na mesma proporção para que o ângulo θ seja igual em ambos. Registaram-se os ângulos θ de modo a efetuar os cálculos da distância através da expressão (19), utilizando a geometria triangular da experiência.

O laser e o detetor são, de todos os materiais utilizados, os que têm maior interferência nos resultados obtidos. Assim, torna-se imprescindível a análise das especificações de cada um, de forma a contabilizar os erros e a precisão que é possível obter com estes materiais.

5.1.1.1. Laser vermelho de hélio-néon JDS Uniphase 1100 Series

Dentro desta série de lasers, o laser utilizado foi o modelo 1101/P. As suas especificações são as seguintes [18]:

- Potência máxima: 3 mW;
- Potência mínima: 1.5 mW;
- Comprimento de onda: 632,8 nm;
- Diâmetro do feixe laser: 0,63 mm;
- Divergência do feixe laser: 1,3 mrad;
- Tensão DC: 1700 ± 100 V;
- Corrente elétrica: $4,9 \pm 0,1$ mA;

- Tempo de aquecimento máximo: 10 min.

Este laser apresenta um baixo ruído, grande estabilidade de potência e vida longa na maior parte das aplicações. Tem uma estabilidade do apontador do feixe excepcional, o que permite obter resultados consistentes com a montagem experimental utilizada onde o laser se encontra imóvel.

5.1.1.2. Detetor Model 818-sl

O detetor utilizado nesta experiência tem as seguintes especificações [19]:

- Gama espectral: 400 a 1100 nm;
- Densidade de potência máxima com atenuador: 2 W/cm²;
- Densidade de potência máxima sem atenuador: 2 mW/cm²;
- Energia máxima do impulso com atenuador: 1 µJ/cm² (com largura do impulso de 15 ns);
- Energia máxima do impulso sem atenuador: 1 nJ/cm² (com largura do impulso de 15 ns);
- Incerteza de calibração: 1% no intervalo 400-940 nm;
- Tempo de subida: inferior a 2 µs;
- Resistência de derivação: superior a 10 MΩ;
- Material: silício;
- Potência equivalente de ruído: 0,45 pW/√Hz;
- Área ativa: 1 cm²;
- Diâmetro ativo: 1,13 cm;
- Forma: cilíndrica;
- Temperatura de operação: 5°C a 50°C com humidade relativa <70%.

O detetor vem com um atenuador destacável que permite atenuar o sinal na ordem de 10³. Como as condições do laboratório permitiram ter valores baixos de luminosidade exterior, optou-se por não utilizar o atenuador pois o medidor de potência tinha alcance suficiente para efetuar as medições sem o atenuador.

5.1.2.Resultados Obtidos

Como referido anteriormente, todos os ângulos observados no suporte móvel circular do detetor foram guardados num ficheiro Excel. Neste ficheiro, efetuaram-se os cálculos da distância utilizando a expressão (19). Utilizando o software *Wolfram Mathematica 10.3 Student Edition*, introduziram-se todos os valores de distância D obtidos numa lista denominada por Dado, através da instrução AppendTo. Cada valor foi introduzido com o objetivo de observar graficamente os resultados obtidos. Assim, cada valor introduzido na lista tinha 3 parâmetros:

- A abcissa do gráfico que corresponde à posição do dado no plano horizontal. Como em cada varrimento horizontal se efetuaram cerca de 200 registos, o valor da abcissa variou entre 1 e 200;
- A ordenada do gráfico corresponde à zona no plano vertical do dado onde se estava a efetuar o varrimento. O dado foi corrido de baixo para cima, pelo que a ordenada 1 corresponde à zona inferior do dado (onde não se encontra nenhuma pinta), a ordenada 6 corresponde à zona central do dado (onde se encontra 1 pinta) e a ordenada 11 corresponde à zona superior do dado (onde não se encontra, novamente, nenhuma pinta). As ordenadas do dado estão especificadas na Figura 15;
- O valor da distância em cm calculada no ficheiro Excel.

A Figura 27 mostra as abcissas e as ordenadas acima referidas.

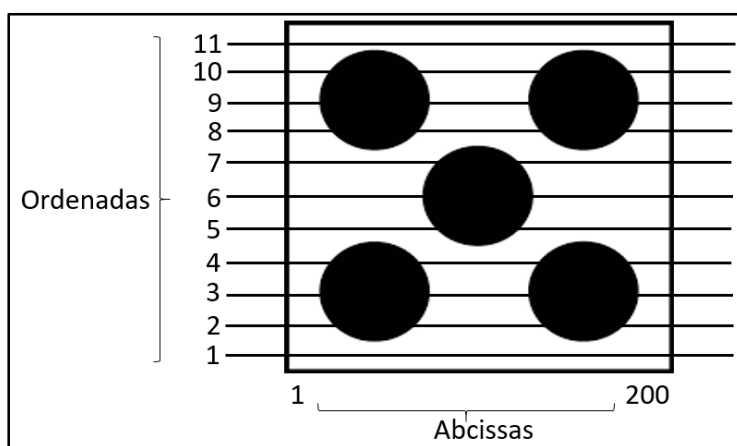


Figura 27 - Zonas da face 5 do dado

Depois de introduzidos todos os valores na lista, efetuou-se o ContourPlot dos dados com uma interpolação de 3ª ordem e obteve-se o Gráfico 2.

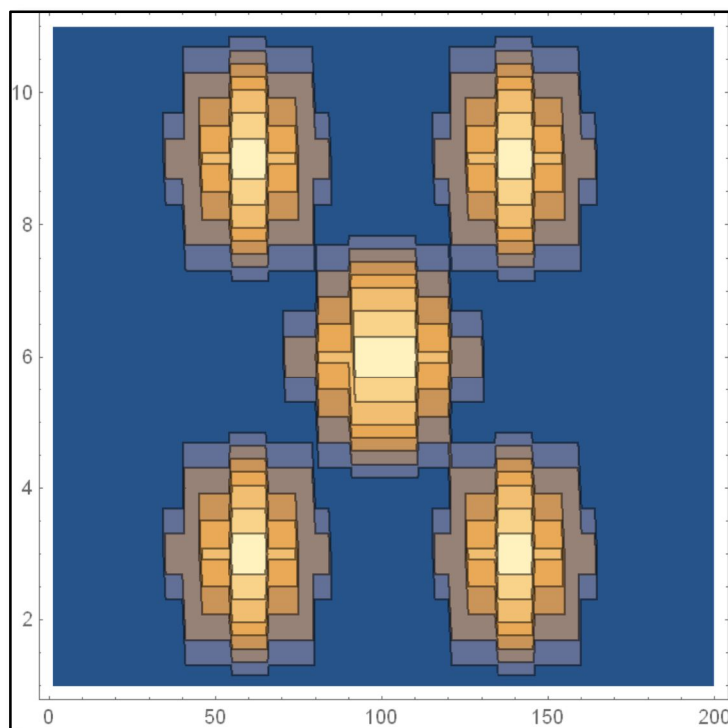


Gráfico 2 - Resultados obtidos no método da triangulação

Observando o Gráfico 2, tendo em conta que as zonas mais em tons de azul correspondem a valores de distância menores e as zonas mais em tons de laranja correspondem a valores de distância maiores, denotam-se 5 zonas mais amarelas no meio do gráfico, às quais correspondem as 5 pintas do dado (2 em cima, 1 no meio e mais 2 em baixo).

5.1.3. Erros experimentais

Os erros experimentais dividem-se em dois tipos de natureza distinta: os erros sistemáticos e os erros aleatórios.

Os erros sistemáticos têm causas possíveis de identificar e, nalguns casos, são passíveis de ser eliminados. No caso particular desta experiência, os erros sistemáticos estão presentes no detetor. No detetor a teoria prevê ruído, em grande parte térmico, associado com a resistência efetiva do fotodíodo e ruído de disparo de corrente escura. No entanto, como apenas se pretende detetar o máximo de potência para determinar o ângulo θ , este erro não afeta os resultados obtidos.

Os erros aleatórios são o resultado do efeito de pequenas perturbações que variam de experiência para experiência. Neste caso particular, destacam-se três erros aleatórios: a variação da luminosidade do laboratório, a minha precisão manual e as reflexões no laboratório. A variação de luminosidade do laboratório resulta do facto de ter uma janela semiaberta para ter luz suficiente para ler os valores do medidor de potência. A quantidade de luz que entra é variável ao longo dos dias devido à meteorologia e à hora do dia. Como o detetor é sensível, estas pequenas variações poderiam fazer-se notar nos resultados. Para corrigir este erro, utilizou-se um diafragma para limitar a luz de

entrada no detetor e uma lente para direcionar o impulso laser refletido para o detetor. A minha precisão manual é o erro aleatório com mais impacto nas medições efetuadas. O dado está fixo num suporte móvel, que é movimentado através de um sistema rotativo onde exerço força para rodar um parafuso micrométrico. Assim, a quantidade de rotação do parafuso provoca a movimentação do dado de forma proporcional. Embora eu tentasse rodar sempre o mesmo, na verdade é humanamente impossível conseguir sempre a mesma quantidade de rotação, pelo que, na análise dos resultados tem de se ter em conta este erro. As reflexões no laboratório são outro erro aleatório porque estas variam consoante a posição dos objetos dentro do laboratório, a minha posição, a posição do computador e, mesmo no movimento efetuado para rodar o parafuso, o meu braço e a minha mão podem aumentar ou diminuir as reflexões que chegam ao detetor. Este erro é de muito difícil correção, devido à proximidade dos materiais e à necessidade de utilizar o suporte móvel.

Como a distância depende do ângulo observado, quando o detetor apresenta uma potência máxima para cada ponto no dado, nenhum destes erros condicionou a experiência de forma significativa.

5.2. Método da Telemetria por Impulsos

Neste subcapítulo pretende-se descrever a experiência proposta para a medição de distâncias utilizando o método da telemetria por impulsos, referindo os materiais e a montagem experimental a utilizar.

5.2.1. Montagem Experimental

Esta montagem experimental contém os seguintes materiais:

1. Laser vermelho;
2. Placa PCB (*Printed Circuit Board*);
3. Alvo;
4. 2 Espelhos semitransparentes;

A Figura 28 mostra o esquema da experiência proposta para medir a distância até um alvo utilizando o método da telemetria por impulsos.

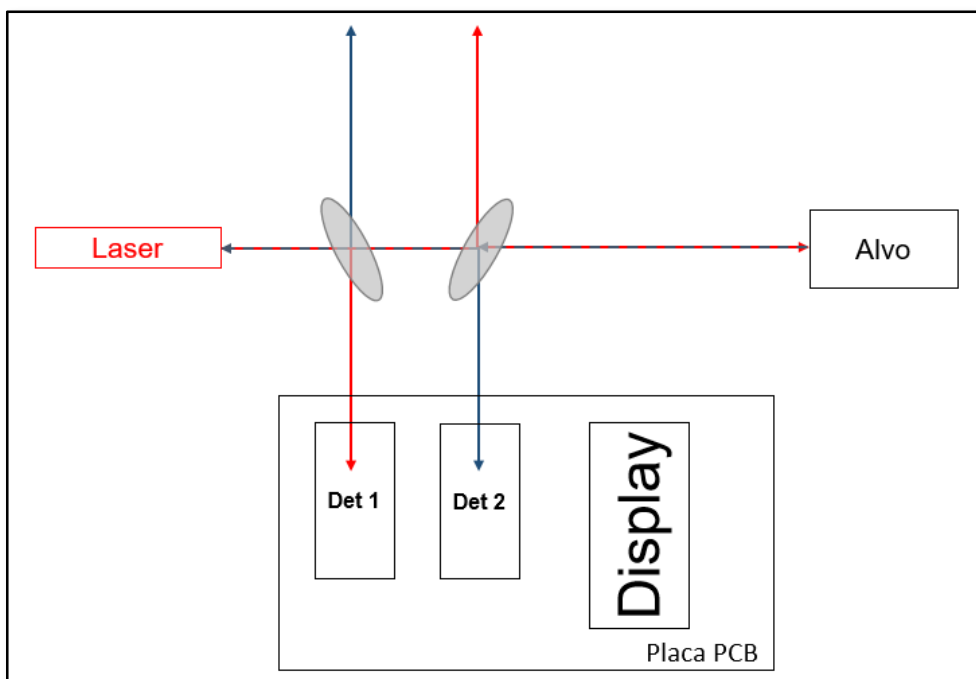


Figura 28 - Esquema da experiência do método da telemetria por impulsos

Como se pode observar na Figura 28, um impulso laser é emitido pelo laser em direção ao alvo. Esse impulso laser (representado a vermelho) entra em contacto com o primeiro espelho semitransparente que divide o impulso laser em dois impulsos. Um dos impulsos segue o seu percurso até ao alvo enquanto o outro impulso segue em direção ao primeiro fotodetector (Det 1) para dar início à contagem numa placa PCB. O impulso laser refletido pelo alvo (representado a azul) entra em contacto com o segundo espelho semitransparente que divide o impulso em dois impulsos. Um segue em direção ao segundo fotodetector (Det 2) para parar a contagem na placa PCB enquanto o outro segue em direção ao laser sem interferir no processo de medida. Observando o display da placa PCB, obtém-se a contagem elaborada a determinada frequência de relógio, obtendo-se o valor de N para calcular a distância pela expressão (7).

O elemento crucial nesta montagem experimental é a placa PCB projetada, pelo que será detalhada de seguida.

5.2.1.1. Placa PCB

A placa PCB foi desenhada recorrendo ao *software* EAGLE 7.2.0. Este software permite desenhar o esquema da placa recorrendo a circuitos integrados que vêm incluídos nas suas bibliotecas próprias ou desenhar novos circuitos integrados caso seja necessário. Depois de desenhado o circuito, o software permite também passar os elementos para uma placa virtual com dimensões reais onde se escolhem as ligações mais eficientes entre elementos. Ao longo deste subcapítulo vão ser apresentadas algumas figuras retiradas do EAGLE 7.2.0 que mostram o desenho do esquema e a placa desenvolvida.

O objetivo da placa PCB é determinar o tempo-de-voo que o impulso laser demora a percorrer a distância até ao alvo e de volta à placa. Esse tempo será usado, através da expressão (7) para determinar a distância entre a placa e o alvo como foi referido anteriormente. A contagem inicia-se quando o impulso laser incide no primeiro fotodetetor e termina quando o impulso laser incide no segundo fotodetetor. Observando o resultado da contagem nos displays (valor de N da expressão (7)), calcula-se a distância pretendida. O circuito desenhado na placa vai ser detalhado ao longo deste subcapítulo, explicando todo o mecanismo desde o início até ao fim da contagem. A Figura 29 mostra o esquema elaborado no EAGLE 7.2.0.

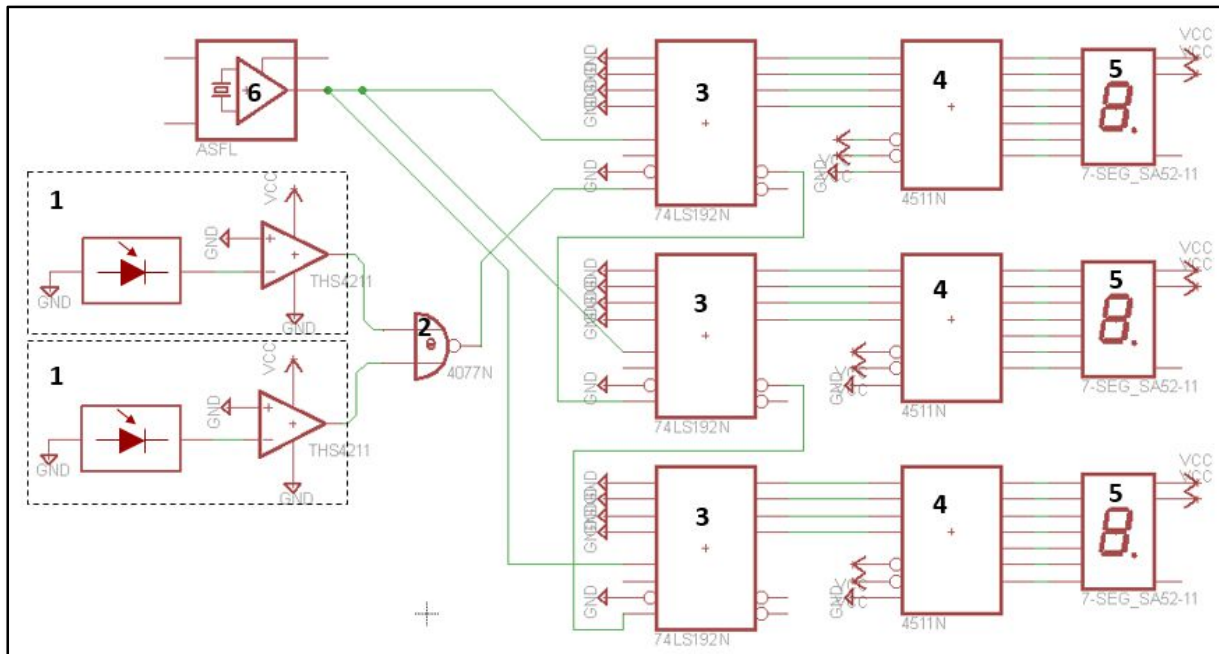


Figura 29 - Esquema da montagem da telemetria por impulsos no EAGLE 7.2.0

A placa tem três níveis de tensão: -Vcc a -5 V, Vcc a 5 V e GND a 0 V. Como se pode observar na Figura 29, todos os circuitos integrados utilizados têm um número identificativo, para serem descritos de seguida.

1. Bloco fotodíodo de alta velocidade SFH2701 e amplificador de alta velocidade THS4021

O bloco fotodíodo e amplificador são o fotodetetor da montagem, pelo que são descritos como um bloco. Como se pode observar na Figura 29, os dois fotodetetores estão ligados às entradas da porta lógica *Exclusive-NOR* (XNOR). O objetivo dos fotodetetores é colocar o valor lógico '1' nas entradas do XNOR quando recebe a luz de um impulso laser. Enquanto o impulso laser não incide sobre o fotodetetor, é colocado o valor lógico '0' nas entradas do XNOR. A lógica implementada será detalhada quando se abordarem os elementos 2 (porta XNOR) e 3 (contador). De seguida, descrevem-se os dois elementos deste bloco em separado.

Começando pelo fotodíodo de alta velocidade SFH2701, este é especialmente usado em aplicações que funcionam em comprimentos de onda entre 400 nm e 1050 nm. Note-se que o vermelho (cor do impulso laser) situa-se entre 620 nm e 750 nm, pelo que está dentro da gama do fotodíodo. O SFH2701 tem como principais características um rápido tempo de comutação e um muito reduzido

tempo de decaimento. Para um comprimento de onda de 650 nm (dentro da gama do vermelho), o SFH2701 tem as seguintes especificações (considerando uma tensão inversa de 5V) [20]:

- Gama de temperaturas de operação: -40 °C a 85 °C;
- Sensibilidade espectral: 0.45 A/W;
- Foto corrente: 1.2 μ A;
- Gama espectral: 400 nm a 1050 nm;
- Área de sensibilidade radiante: 0.36 mm²;
- Corrente escura: 0.05 nA;
- Tempo de subida e descida: 1.8 ns;
- Tensão direta: 0.8 V.

O SFH é um elemento de montagem superficial e tem apenas 2 pinos – o cátodo e o ânodo. A Figura 30 mostra uma imagem do fotodiodo e a sua configuração dos pinos.

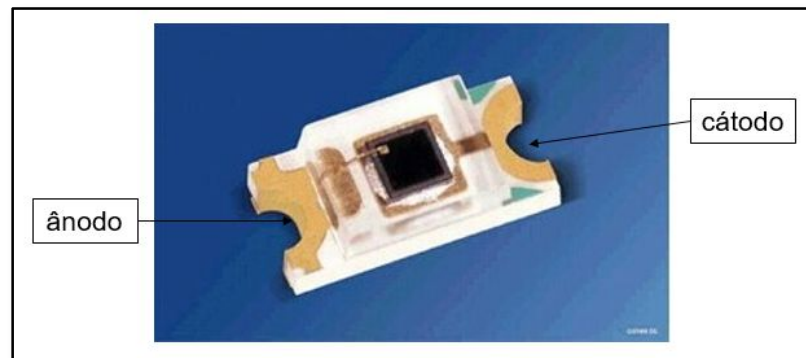


Figura 30 - Fotodiodo SFH2701

O amplificador THS4021 tem como principais características a largura de banda máxima de 350 MHz (que o torna bastante rápido), o baixo ruído de tensão, a estabilidade em ganhos de 10 (-9 no caso da montagem inversora) ou superiores, alta corrente de saída (tipicamente 100 mA) e baixa distorção. O THS4021 tem as seguintes especificações (considerando Vcc de 5 V) [21]:

- Largura de banda: 280 MHz (G = 10, -3 dB);
- Tempo de estabilização: 40 ns (0.1%);
- Distorção harmónica total (THD): -68 dBc (f = 1 MHz);
- Corrente de saída máxima: 150 mA;
- Temperatura de operação: -40 °C a 85 °C;
- Ruído de tensão de entrada (f > 10 kHz): 1.5 nV/Hz^{1/2};
- Ruído de corrente de entrada (f > 10 kHz): 2 nV/Hz^{1/2}.

A Figura 31 mostra a configuração dos pinos e o circuito interno do TSH4021.

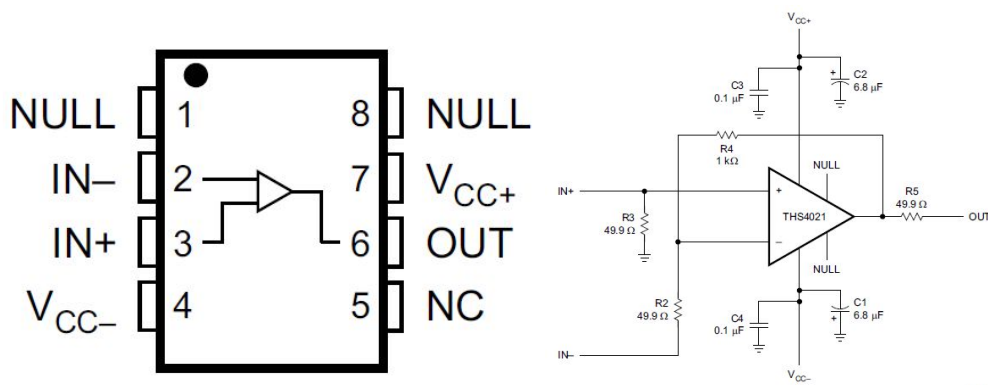


Figura 31 - a) Configuração dos pinos do THS4021 b) Circuito interno do THS4021

Como se pode observar na Figura 31-a), o amplificador liga-se a $-V_{CC}$ no pino 4 e a $+V_{CC}$ no pino 7. Utilizando a montagem inversora, o ganho é dado pela expressão (20) [20]:

$$g = \frac{R_F}{R_G} = \frac{-R_4}{R_2} \quad (20)$$

Observando a Figura 31-b), tem-se R_4 de 1 kΩ e R_2 de 49.9 Ω. Assim, esta montagem inversora vem com um ganho de -20.

O bloco conecta-se com a ligação entre o cátodo do fotodíodo e o pino 2 do amplificador (entrada inversora). A saída do amplificador (6) liga-se a uma das entradas da porta XNOR, cuja descrição será feita de seguida.

2. XNOR 4077

As saídas dos amplificadores ligam-se à porta lógica XNOR como foi referido anteriormente. O uso desta porta lógica é necessário para dar sinal ao primeiro contador (elemento 3 da Figura 28) para iniciar e parar a contagem. O contador tem um *Asynchronous Master Reset (Clear) Input* (pino 14) que tem como função habilitar o contador a funcionar. Assim, quando o pino 14 do contador está com o valor lógico '1', o contador está parado. Quando o pino 14 do contador está com o valor lógico '0', o contador está ativo. O que foi implementado no circuito foi o seguinte: quando o primeiro fotodetector “deteta” a luz proveniente do impulso laser, o contador fica ativo iniciando a contagem. Neste instante, a entrada do pino 14 tem de ter o valor lógico '0'. Quando o segundo fotodetector “deteta” a luz que vem refletida do alvo, o contador desliga-se, parando a contagem. Neste instante, a entrada do pino 14 tem de ter o valor lógico '1'.

Para obter estes valores lógicos na entrada do pino 14 do contador, recorreu-se ao bloco XNOR. A Tabela 2 mostra a tabela lógica da porta XNOR.

XNOR		
Entradas		Saída
A	B	A XNOR B
0	0	1
0	1	0
1	0	0

1	1	1
---	---	---

Tabela 2 - Lógica da porta XNOR

Como se pode verificar na Tabela 2, quando um dos fotodetetores coloca o valor lógico '1' no XNOR, induz o valor lógico '0' no pino 14 do contador e, quando ambos colocam o valor lógico '1' no XNOR, o valor lógico do pino 14 muda para '1', parando a contagem.

3. Contador 74LS192N

O circuito integrado 74LS192N é um contador decimal que permite contagem decrescente e crescente sincronamente. As saídas mudam de estado em sincronia com as transições *low-to-high* das entradas do relógio. Como foi referido anteriormente, o contador tem um *Asynchronous Master Reset (Clear) Input* no pino 14 que tem como função habilitar o contador a funcionar. O contador tem as seguintes especificações [23]:

- Tensão de entrada: entre 4.75 V e 5.25 V;
- Corrente de saída '1': -0.4 mA;
- Corrente de saída '0': 8 mA;
- Tensão de saída '1': 3.5 V;
- Tensão de saída '0': 0.35 V;
- Gama de temperatura de operação: 0 °C a 70 °C;
- Frequência máxima de relógio: 32 MHz;
- Tempo de configuração dos dados: 20 ns;
- Tempo de espera dos dados: 5 ns;
- Tempo de recuperação: 40 ns.

A Figura 32 mostra a configuração dos pinos do contador 74LS192N.

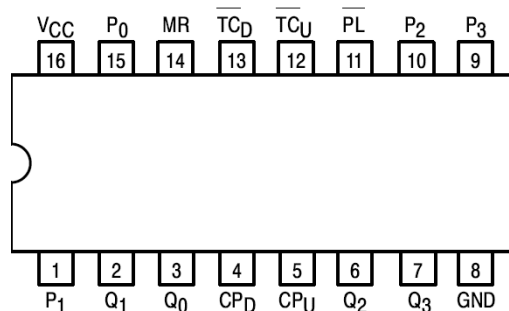


Figura 32 - Configuração dos pinos do contador 74LS192N

A Tabela 3 mostra os nomes dos pinos do contador 74LS192N.

Pino	Nome do pino
CP _U	Entrada do impulso do relógio – contagem crescente
CP _D	Entrada do impulso do relógio – contagem decrescente
MR	Entrada do <i>Master Reset</i> assíncrono
PL	Entrada da carga paralela assíncrona

P_n	Entradas de dados em paralelo
Q_n	Saídas da contagem
TC_D	Saída da contagem decrescente terminal
TC_U	Saída da contagem crescente terminal

Tabela 3 - Nomes dos pinos do contador 74LS192N

De seguida será abordado o funcionamento do contador no circuito apresentado. Os 3 contadores recebem a mesma entrada do impulso do relógio no pino 5 pois pretende-se uma contagem no sentido crescente. Assim, quando o MR (pino 14) está com valor lógico '0', o contador efetua a contagem ao ritmo do relógio (se este não superar os 35 MHz pois é a frequência de relógio máxima permitida no contador) até o MR ficar com o valor lógico '1'. As 4 entradas P_n são colocadas a 0, ou seja, ligadas à terra para que a contagem se inicie do 0 quando o primeiro fotodetector receber o impulso laser (MR a '0').

Cada contador consegue efetuar contagens de 0 a 9. Como tal, o pino 12 (saída da contagem crescente terminal) do primeiro contador (contador superior da Figura 29) liga-se ao MR do segundo contador (contador central da Figura 29) e o pino 12 do segundo contador liga-se ao MR do terceiro contador (contador inferior da Figura 29). Assim, quando a contagem chega a 9 no primeiro contador, este provoca uma contagem no segundo contador. Quando a contagem do segundo contador chega a 9, este provoca uma contagem no terceiro contador, e assim sucessivamente até ser atingido o número 999. Se a contagem chegar a 999, inicia-se do zero em todos os contadores.

Como se pode verificar na Figura 29, cada contador está ligado a um descodificador que, por sua vez, se liga a um display. As saídas Q_n representam a saída da contagem em código binário. A Tabela 4 mostra a correspondência entre o algarismo da contagem decimal e o código binário correspondente nas saídas Q_n .

Algarismo	Q_3	Q_2	Q_1	Q_0	Algarismo	Q_3	Q_2	Q_1	Q_0
0	0	0	0	0	5	0	1	0	1
1	0	0	0	1	6	0	1	1	0
2	0	0	1	0	7	0	1	1	1
3	0	0	1	1	8	1	0	0	0
4	0	1	0	0	9	1	0	0	1

Tabela 4 - Correspondência entre a contagem decimal e a saída em binário

De seguida será feita a descrição do descodificador referido anteriormente.

4. Descodificador 4511N

O descodificador 4511N é o elemento intermediário entre o contador e o display. A razão da sua utilização deve-se ao facto de os displays disponíveis para a construção da placa serem de 7 segmentos. Assim, há a necessidade de converter as saídas Q_n do contador em binário nas entradas do display em 7 segmentos que são representados por letras desde 'a' até 'g'. A Figura 33 mostra a

configuração dos pinos do decodificador 4511N, em que as letras maiúsculas correspondem às saídas Q_n do contador e as letras minúsculas às entradas do display [24].

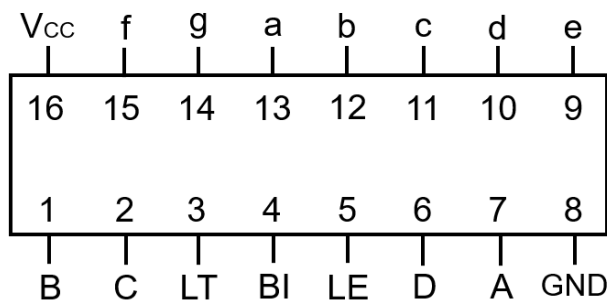


Figura 33 - Configuração dos pinos do decodificador 4511N

O decodificador não tem especificações relevantes. É alimentado pelo V_{CC} de 5 V no pino 16 e ligado à terra no pino 8. Os pinos 3 (*Lamp Test* – teste de lâmpada), 4 (*Blanking* - apagamento) e 5 (*Latch Enable* – habilitar/desabilitar) estão disponíveis para testar os displays, desligar ou modelar em intensidade o decodificador e armazenar um código binário, respetivamente. Neste circuito, esses pinos ligam-se à terra ou a V_{CC} , como será descrito de seguida. A Tabela 5 mostra os valores lógicos dos pinos que permitem a decodificação necessária [21].

LE	BI	LT	D	C	B	A	a	b	c	d	e	f	g	Display
0	1	1	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	0	0
0	1	1	0	0	0	1	0	1	1	0	0	0	0	1
0	1	1	0	0	1	0	1	1	0	1	1	0	1	2
0	1	1	0	0	1	1	1	1	1	1	0	0	1	3
0	1	1	0	1	0	0	0	1	1	0	0	1	1	4
0	1	1	0	1	0	1	1	0	1	1	0	1	1	5
0	1	1	0	1	1	0	0	0	1	1	1	1	1	6
0	1	1	0	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	7
0	1	1	1	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	8
0	1	1	1	0	0	1	1	1	1	0	0	1	1	9

Tabela 5 - Valores lógicos dos pinos do decodificador

De seguida será feita a descrição dos displays utilizados para mostrar a contagem efetuada.

5. Display de 7 segmentos SA52-11EWA

O display de 7 segmentos SA52-11EWA é o elemento que vai mostrar a contagem elaborada no contador. Este display emite luz vermelha nos 7 segmentos que o compõem ('a' a 'g'). O display tem as seguintes especificações [26]:

- Dissipação de potência: 75 mW;
- Intensidade de corrente DC: 30 mA;
- Pico de corrente máximo: 160 mA;
- Tensão inversa: 5 V;

- Temperatura de operação: -40 °C a 85 °C.

A Figura 34 mostra a configuração dos pinos do display.

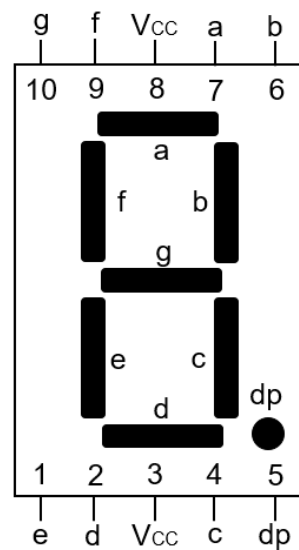


Figura 34 - Configuração dos pinos do display SA52-11EWA

Este display é constituído por díodos que deixam passar corrente para os segmentos que acendem. Por exemplo, para mostrar o algarismo 1, o display recebe o valor lógico '1' nos segmentos 'b' e 'c', e recebe o valor lógico '0' nos restantes. O pino 5 representa o segmento dp (*dot point* – ponto), como se pode observar na Figura 33, mas não tem qualquer importância para o circuito o ponto estar ligado ou desligado pelo que não se efetuou nenhuma ligação ao pino 5 para não sobrecarregar a placa PCB desnecessariamente. Como se pode observar na Figura 34, o display é alimentado com V_{CC} nos pinos 3 e 8.

Para terminar a descrição do circuito, falta fazer a descrição do relógio utilizado.

6. Relógio SG-615P C25.0000M

Neste circuito o contador conta ao ritmo do relógio, pois a saída do relógio está ligada ao pino 5 dos 3 contadores. Como foi referido anteriormente, o contador utilizado permite uma frequência máxima de relógio de 35 MHz. Assim sendo, optou-se por utilizar o relógio SG-615P C25.0000M. Este relógio impõe uma oscilação com frequência de 25 MHz, ou seja, abaixo dos 32 MHz de frequência máxima permitida.

Este relógio tem as seguintes especificações [27]:

- Tensão de entrada: 4.5 V a 5.5 V;
- Frequência de saída: 25 MHz;
- Corrente máxima consumida: 23 mA;
- Gama de temperatura de operação: -20 °C a 70 °C;
- Tempo máximo de início de oscilação: 4 ms;
- Tempo máximo de saída de descida e de subida: 8 ns.

A Figura 35 mostra a configuração dos pinos do relógio SG-615P C25.0000M.

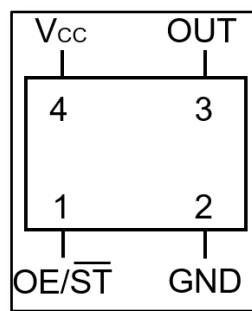


Figura 35 - Configuração dos pinos do relógio SG-615P C25.0000M

O pino 1 permite que o relógio esteja ligado ou desligado. Para o relógio estar ligado, este pino tem de estar ligado a Vcc ou a nada. Optou-se por deixar o pino em aberto para não sobrecarregar o circuito com uma ligação desnecessária. O pino 2 liga-se à terra e o pino 4 liga-se a Vcc. O pino 3 é a saída do relógio e, como tal, liga-se aos pinos 5 dos 3 contadores, como já foi referido.

Com a frequência de relógio de 25 MHz e recorrendo à expressão (8), obtém-se um T de 40 ns. Assim, através da expressão (9) obtém-se uma $2D_{inc}$ de 12 m, ou seja, uma incerteza na medida máxima de 6 m (estes cálculos são semelhantes aos efetuados no subcapítulo 3.2. e 4.2.). Estes valores de incerteza na medida melhorariam muito com uma frequência maior, mas os elementos utilizados no circuito não o permitem. Com um erro de medida de 6 m, considera-se que esta placa tem uma precisão aceitável acima dos 60 m, ou seja, uma grandeza acima do valor da incerteza de medida.

Depois de explicado o circuito e respetivos constituintes, falta colocar todos os elementos interligados dentro da placa. Nesta fase, efetuou-se uma distribuição pela placa de modo a não haver interferência entre circuitos integrados, utilizando o mínimo espaço possível. Como resultado obteve-se uma placa PCB com as dimensões X e Y de 89.70 mm e 79.65 mm, respetivamente. A Figura 36 mostra a placa virtual elaborada no EAGLE 7.2.0 com as suas dimensões reais.

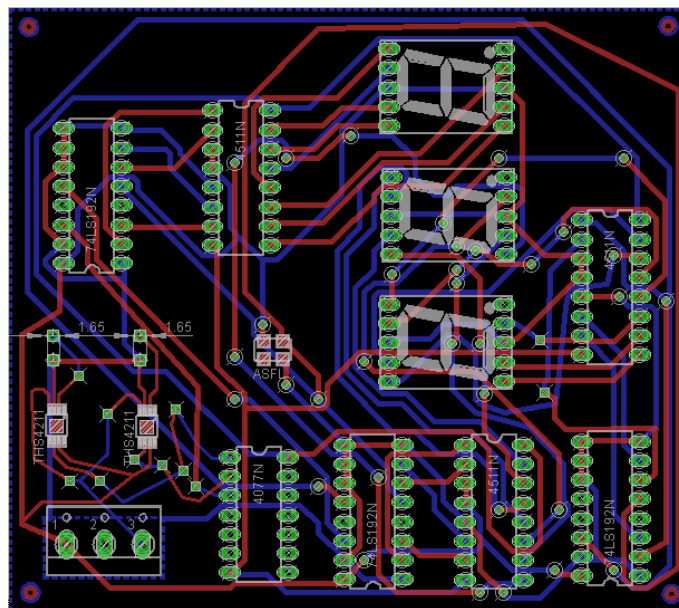


Figura 36 - Placa PCB virtual do método telemetria por impulsos elaborada no EAGLE 7.2.0

Como se pode observar na Figura 36, os elementos estão próximos uns dos outros. No canto inferior esquerdo da Figura 36 pode observar-se a alimentação da placa (V_{CC} de 5 V, GND (ligação à terra) e $-V_{CC}$ de -5 V). A placa PCB tem duas camadas – a superior e a inferior. A camada superior está representada pelas ligações efetuadas a vermelho, enquanto a camada inferior está representada pelas ligações efetuadas a azul. A necessidade de utilizar duas camadas surge do facto das ligações não se poderem intercalar para não provocar erros no circuito. A ligação entre as duas camadas pode surgir de duas formas. Uma delas é através dos circuitos integrados que perfuram as duas camadas ligando a camada superior e inferior ao mesmo pino do circuito integrado. A outra é através de vias que se colocam distribuídas pela placa e que tem como único objetivo interligar as duas camadas através de um buraco ao qual se ligam as duas camadas. Para o bom funcionamento da placa, as ligações não devem ter ângulos de 90° nem devem estar muito próximas umas das outras para evitar interferências. A largura das ligações deve ser a maior possível para evitar roturas das ligações nos pontos críticos, ou seja, nas vias e nos pinos dos circuitos integrados. A Figura 37 mostra as duas camadas em separado, sem os circuitos integrados, para se poder observar que em cada camada não há ligações intercaladas por outras, a não ser que tenham uma tensão igual durante todo o tempo, como, por exemplo, as ligações a V_{CC} e a GND.

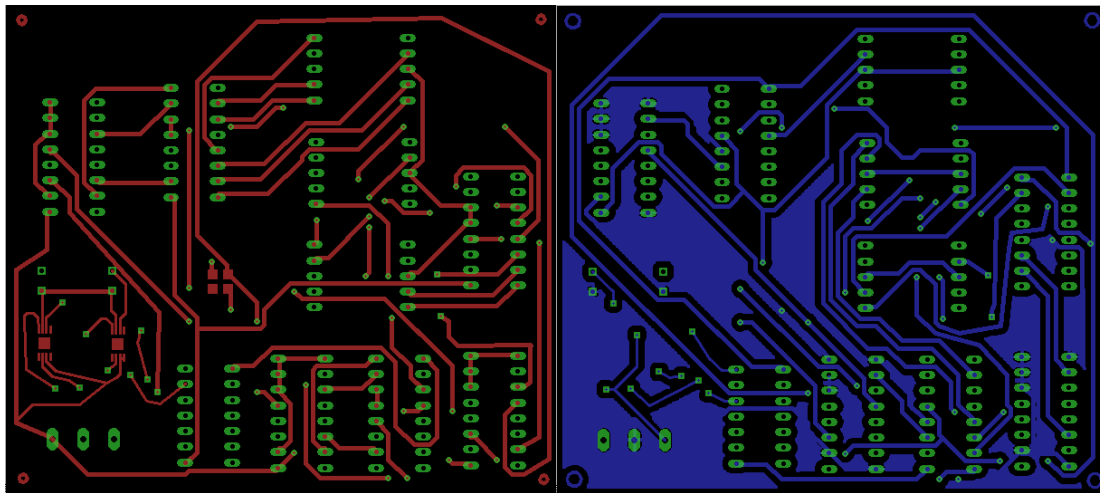


Figura 37 - Camada superior e inferior da placa PCB

Como se pode observar na Figura 36 e na Figura 37, nos quatro cantos da placa há um círculo vermelho dentro de um círculo azul. Este círculo serve para assegurar que as camadas superior e inferior se ligam na perfeição, ou seja, o círculo a vermelho (da camada superior) tem de encaixar no círculo a azul (da camada inferior) nos quatro cantos para que as camadas fiquem plenamente interligadas, formando a placa PCB.

5.3. Método da Telemetria por Comparação de Fase

Neste subcapítulo pretende-se descrever a experiência proposta para a medição de distâncias utilizando o método da telemetria por comparação de fase, referindo os materiais e a montagem experimental a utilizar.

5.3.1. Montagem Experimental

Esta montagem experimental contém os seguintes materiais:

1. Laser vermelho;
2. Placa PCB;
3. Alvo;
4. 2 Espelhos semitransparentes;

A Figura 38 mostra o esquema da experiência proposta para medir a distância até um alvo utilizando o método da telemetria por comparação de fase.

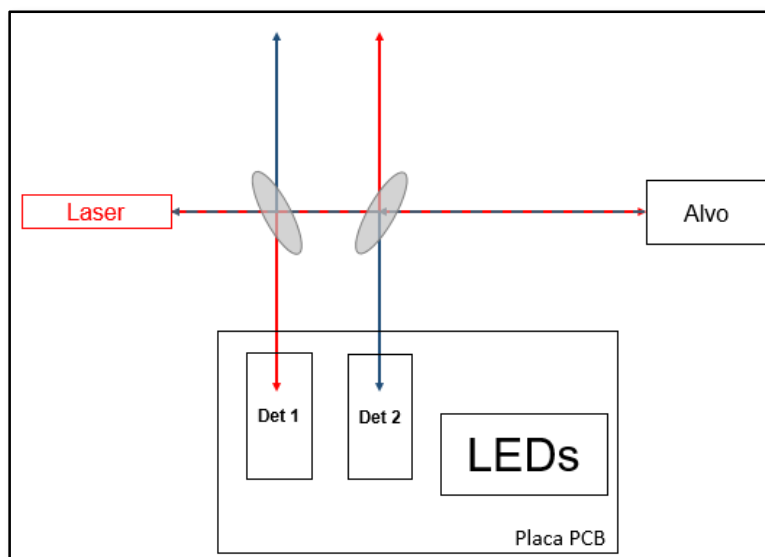


Figura 38 - Esquema da experiência do método da telemetria por impulsos

Como se pode observar na Figura 38, um impulso laser é emitido pelo laser em direção ao alvo. O esquema é bastante semelhante ao esquema representado na Figura 28. A diferença neste esquema reside na placa PCB. Assim, à semelhança do esquema da Figura 28, o impulso laser entra em contacto com o primeiro espelho semitransparente que divide o impulso laser em dois impulsos. Um dos impulsos segue o seu percurso até ao alvo enquanto o outro impulso segue em direção ao primeiro fotodetector (Det 1). O impulso laser refletido pelo alvo (representado a azul) entra em contacto com o segundo espelho semitransparente que divide o impulso em dois impulsos. Um dos impulsos segue em direção ao segundo fotodetector (Det 2) enquanto o outro segue em direção ao laser sem interferir no processo de medida. As saídas dos dois fotodetetores são comparadas de modo a detetar-se a diferença de fase dos dois sinais. Observando os LEDs (*Light Emitting Diode*) da placa PCB, obtém-se um número binário (8 bits) correspondente a um número decimal entre 0 e 255. A tensão é obtida proporcionalmente em relação a este resultado, onde a tensão máxima é de 5 V (corresponde ao número decimal 255) e a tensão mínima é de 0 V (corresponde ao número decimal 0). Esta tensão corresponde à diferença de fase entre os dois impulsos lasers detetados. Com a diferença de fase calculada, recorrendo à expressão (13), obtém-se o valor da distância D pretendida.

À semelhança do subcapítulo 5.2.1, nesta montagem o elemento crucial é a placa PCB projetada, pelo que será descrita de seguida.

5.3.1.1. Placa PCB

A placa PCB foi desenhada recorrendo novamente ao *software* EAGLE 7.2.0. O objetivo da placa PCB é determinar a diferença de fase entre um impulso laser que percorre uma distância conhecida e um impulso laser que é refletido num alvo. Essa diferença de fase será usada, através da expressão (13) para determinar a distância entre a placa e o alvo como foi referido anteriormente.

O circuito desenhado na placa vai ser detalhado ao longo deste subcapítulo, explicando todo o mecanismo projetado. A Figura 39 mostra o esquema elaborado no EAGLE 7.2.0.

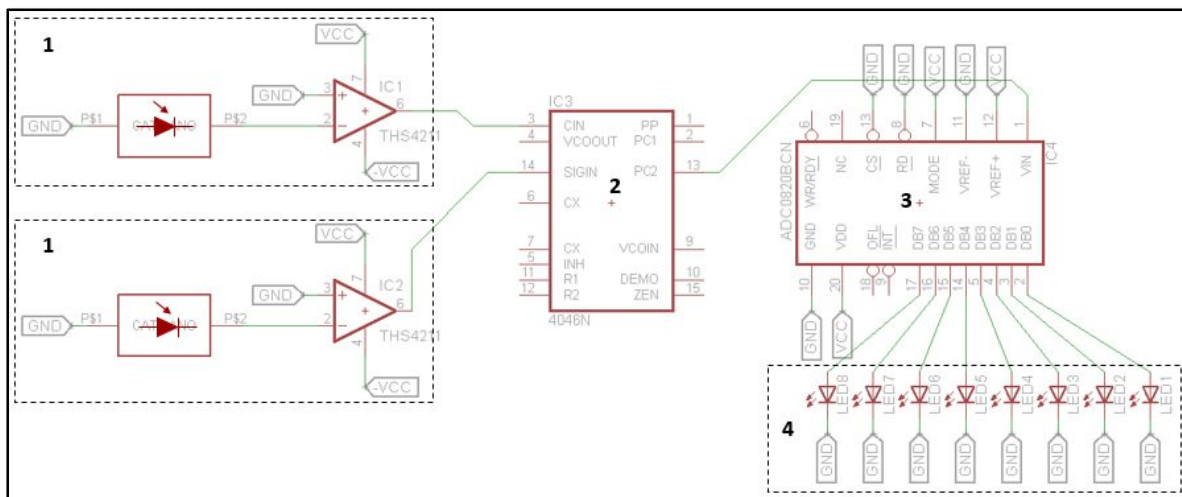


Figura 39 - Esquema da montagem da telemetria por comparação de fase no EAGLE 7.2.0

A placa tem três níveis de tensão: -Vcc a -5 V, Vcc a 5 V e GND a 0 V. Como se pode observar na Figura 39, à semelhança do subcapítulo 5.2.1.1, todos os circuitos integrados utilizados têm um número identificativo, para serem descritos de seguida.

1. Bloco fotodíodo de alta velocidade SFH2701 e amplificador de alta velocidade THS4021

O bloco fotodíodo e amplificador são o fotodetector da montagem e já foram descritos no subcapítulo 5.2.1.1, pelo que não necessitam de ser explicados. As saídas dos fotodetetores ligam-se às entradas do comparador de fase que integra o PLL (*Phase-Locked Loop*), que será descrito de seguida.

2. PLL CD74HCT4046A

O PLL CD74HCT4046A é um circuito de malha de captura de fase que contém um oscilador controlado por tensão (VCO – *Voltage-controlled oscillator*) e três comparadores de fase diferentes [28]. As duas entradas dos sinais a comparar são comuns a cada comparador. Neste circuito utilizou-se apenas o segundo comparador de fase, como será descrito de seguida.

A Figura 40 mostra um diagrama funcional deste PLL.

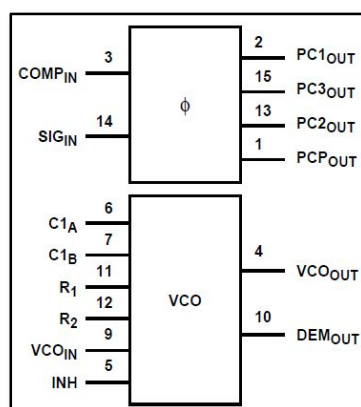


Figura 40 - Diagrama funcional do PLL

Como se pode observar na Figura 40, além da alimentação do circuito integrado (V_{CC} e GND nos pinos 16 e 8, respetivamente), apenas se utilizaram os pinos 3 e 14 para as entradas dos dois sinais e o pino 13 (saída do segundo comparador) para ligar à entrada analógica de um ADC (*Analog-to-digital converter*).

A saída deste comparador tem a função de transferência da expressão (21), considerando que se utiliza o comparador de forma isolada do resto do PLL. Note-se que V_{PC2out} representa a tensão de saída do segundo comparador, φ_{SIGin} representa a fase do sinal do segundo fotodetetor e φ_{COMPin} representa a fase do sinal do primeiro fotodetetor.

$$V_{PC2out} = \frac{V_{CC}}{4\pi}(\varphi_{SIGin} - \varphi_{COMPin}) \quad (21)$$

Cada tensão de saída corresponde a determinada diferença de fase. A Figura 41 mostra a correspondência entre a tensão V_{PC2out} e a diferença de fase $\varphi_{SIGin} - \varphi_{COMPin}$.

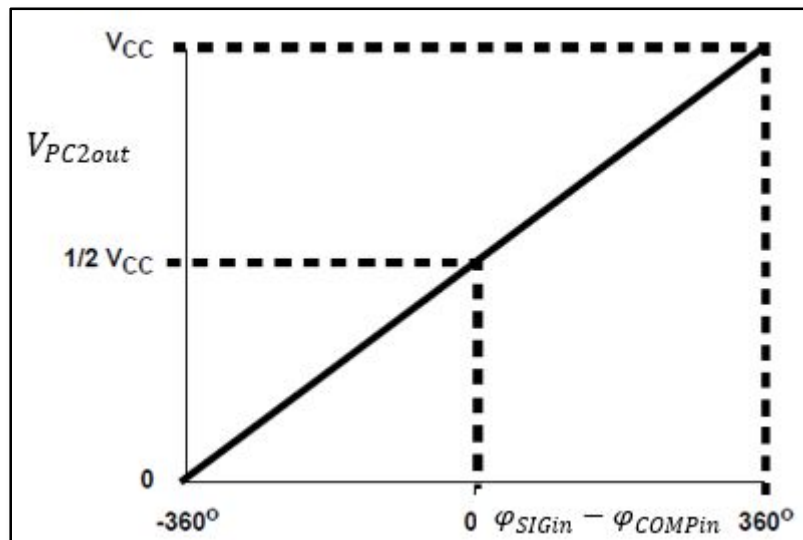


Figura 41 - Tensão de saída do segundo comparador em relação à diferença de fase dos sinais

Como se pode observar na Figura 41, a relação entre a tensão de saída do segundo comparador e a diferença de fase dos sinais dos fotodetetores é linear.

As especificações do PLL que interessam no projeto desta placa PCB são as seguintes:

- Tensão de entrada: 4.5 V a 5.5 V;
- Frequência de operação máxima: 18 MHz;
- Gama de temperatura de operação: -55°C a 125°C .

Como foi referido anteriormente, a saída do segundo comparador (pino 13) liga-se à entrada de um ADC que será descrito de seguida.

3. ADC 0820N

O ADC, como o próprio nome indica, é utilizado para fazer a conversão do sinal analógico que sai do comparador num sinal digital que será mostrado num conjunto de LEDs. O ADC 0820N tem as seguintes especificações [29]:

- Tensão de entrada: 4.5 V a 8 V;
- Tempo de conversão máximo: 1.5 μ s;
- Resolução: 8 Bits;
- Potência dissipada: 75 mW;
- Gama de temperatura de operação: -55 °C a 125 °C.

A Figura 42 mostra a configuração dos pinos deste ADC.

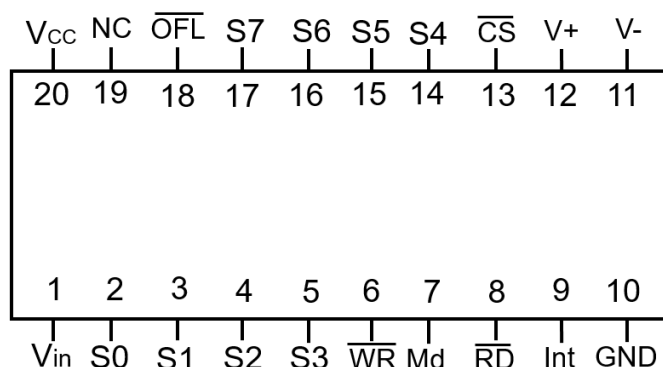


Figura 42 - Configuração dos pinos do ADC 0820N

Como se pode observar na Figura 42, o ADC é alimentado por V_{CC} e GND nos pinos 20 e 10, respetivamente. A saída do comparador liga-se ao pino 1 (V_{in}) do ADC, que representa o sinal analógico que se quer converter. As 8 saídas do ADC (S0 a S7) ligam-se a 8 LEDs para se determinar o número binário correspondente. As tensões de referência (V+ e V-) são os valores máximo e mínimo permitido para a entrada V_{in}, que pode variar entre 0 V e 5 V. Assim, ligaram-se os pinos 12 e 11 a V_{CC} e a GND, respetivamente. Para colocar o ADC em modo de funcionamento, colocaram-se os pinos 8 e 13 ligados à terra (GND) e o pino 7 ligado a V_{CC}, seguindo o *datasheet* do ADC. Os restantes pinos não foram ligados.

Como o ADC tem 8 bits de resolução, a tensão analógica de entrada será convertida num número binário de 8 bits que corresponde a uma gama de valores decimais entre 0 e 255, como já tinha sido referido anteriormente. O número binário obtido é observado nos 8 LEDs que serão descritos de seguida.

4. LEDs HLMP – Y402-G00

Os 8 LEDs utilizados têm cor laranja e são os elementos que vão mostrar o número binário correspondente às saídas do ADC. Estes LEDs têm as seguintes especificações [30]:

- Intensidade de corrente contínua máxima: 20 mA;
- Pico de intensidade de corrente máxima: 60 mA;
- Gama de temperatura de operação: -40 °C a 100 °C;

- Temperatura de junção máxima: 110 °C;
- Tensão inversa máxima: 5 V.

Como se pode observar na Figura 39, as saídas do ADC ligam-se ao ânodo de cada LED. Os cátodos dos LEDs ligam-se à terra. Assim, quando a saída Sx do ADC está com o valor lógico '0', o LED correspondente está desligado. Quando a saída Sx do ADC está com o valor lógico '1', o LED correspondente está ligado, emitindo luz de cor laranja como já foi referido anteriormente.

Os LEDs estão distribuídos na placa PCB de modo sequencial, ou seja, o LED que representa o bit menos significativo encontra-se mais à direita da placa e o LED que representa o bit mais significativo encontra-se mais à esquerda da placa.

Assim, convertendo o número binário de 8 bits no respetivo número decimal, determina-se a diferença de fase correspondente, e calcula-se a distância pretendida através da expressão (13). A frequência de modulação utilizada não poderá ultrapassar os 18 MHz, pois é a frequência máxima permitida no PLL utilizado.

A tensão será quantificada em 256 partes, onde cada parte representa 0.019531 V pois a diferença de tensão é de 5 V. Observando a Figura 41, temos que quando a diferença de fase é positiva, a tensão varia entre 2.5 V e 5V e quando a diferença de fase é negativa, a tensão varia entre 0 e 2.5 V. Considerando o caso em que a diferença de fase é positiva, temos 128 níveis de tensão para representar os 360° (2π radianos) de diferença de fase possíveis. Assim, cada nível de tensão representa 2.8125°, ou seja, 0.049087 radianos (a diferença de fase será calculada em radianos). Note-se que até uma distância de meio comprimento de onda não há necessidade de utilizar duas frequências de modulação, pelo que a expressão (13) pode aplicar-se. Por exemplo, com uma frequência de modulação de 15 MHz, cujo comprimento de onda é 20 m, a distância calculada pode variar entre -10 m e 10 m, consoante seja uma diferença de fase negativa ou positiva. No caso desta montagem experimental, a diferença de fase será sempre positiva, pois a fase do primeiro fotodetetor (φ_{COMPin}) será sempre inferior à fase do segundo fotodetetor (φ_{SIGin}). Por exemplo, se o número obtido for o 130 temos o seguinte:

- Tensão correspondente: $130 \times 0.019531 = 2.53903 \text{ V}$;
- Diferença de fase: como o valor de tensão é superior a 2.5 V, a diferença de fase é positiva. Como estamos 2 níveis de tensão acima dos 2.5 V, temos uma diferença de fase de $2 \times 0.049087 = 0.098174 \text{ rad}$.
- Com uma frequência de modulação de 15 MHz, utilizando a expressão (13) temos:

$$D = \frac{300000000 \times 0.098174}{4\pi \times 15000000} = 15.6249 \text{ cm}$$

Depois de explicado o circuito e respetivos constituintes, e à semelhança do subcapítulo 5.2.1.1, colocaram-se todos os circuitos na placa PCB. Nesta fase, efetuou-se uma distribuição pela placa de modo a não haver interferência entre circuitos integrados, utilizando o mínimo espaço possível. Como resultado obteve-se uma placa PCB com as dimensões X e Y de 88.57 mm e 36.82 mm,

respetivamente. A Figura 43 mostra a placa virtual elaborada no EAGLE 7.2.0 com as dimensões reais da placa.

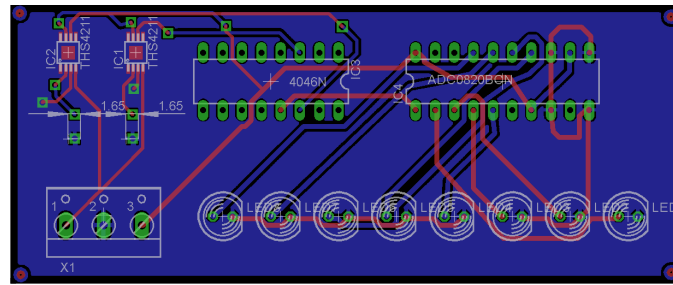


Figura 43 - placa PCB virtual do método telemetria por comparação de fase elaborada no EAGLE 7.2.0

A placa PCB desenvolvida neste método tem as mesmas características da placa desenvolvida no método da telemetria por impulsos, diferindo apenas nos circuitos integrados utilizados.

Capítulo 6

6. Conclusões e perspectivas de trabalho futuro

6.1. Conclusões

As tecnologias de medida com lasers têm diversas aplicações tanto a nível civil como a nível militar – levantamentos topográficos, digitalização 2D e 3D, robôs, UAVs, mísseis teleguiados, entre outros. O estudo dos três métodos abordados nesta dissertação assume, assim, um papel importante para um futuro desenvolvimento de métodos mais complexos, por exemplo, com a junção de 2 ou mesmo dos 3 métodos básicos num único método mais complexo.

Cada um dos métodos é usado preferencialmente para medir distâncias numa gama de valores, especificados na Figura 1. Para concluir a dissertação é importante abordar resumidamente cada método, comentando os resultados da simulação e os resultados práticos quando aplicável.

O método da triangulação permite determinar distâncias ou posições de objetos, através da geometria de triângulos. Efetuou-se um estudo sobre a forma de medir distâncias aplicando este método. No caso específico desta dissertação, definiu-se como base do triângulo a distância entre o detetor e o laser. Para efetuar a medida, determinaram-se os ângulos que os lados do triângulo que interligavam o detetor com o dado e o laser com o dado mediam de forma a ter o máximo de potência recebida no detetor. Para a medida ser correta, estes dois ângulos têm de ser iguais. Com um lado e dois ângulos de um triângulo consegue-se determinar todos os lados restantes e, assim, determinar a distância pretendida.

Efetuuou-se uma simulação no software de programação *Wolfram Mathematica 10.3 Student Edition* que, além de medir a distância do detetor ao alvo, juntou várias medidas por forma a mostrar a superfície da face de 5 pintas de um dado. O resultado desta simulação comprova a teoria, ou seja, aplicando a geometria estudada teoricamente, obteve-se a superfície da face 5 do dado à distância correta.

Para comprovar os resultados teóricos e de simulação, efetuaram-se duas experiências com o método da triangulação. A primeira consistiu num teste para verificar se a aplicação do método funcionava à distância de 50 cm e de 70 cm com um espelho como alvo. Verificou-se que o método resultou plenamente na medida das distâncias mencionadas, ou seja, obteve-se quase a potência máxima do laser a incidir no detetor com os ângulos adaptados às distâncias referidas. Assim, efetuou-se uma segunda experiência com um dado colocado a cerca de 70 cm do detetor. Desta feita, o objetivo foi varrer toda a face de 5 pintas do dado para observar a sua superfície colocando todas as distâncias num programa desenvolvido com o software *Wolfram Mathematica 10.3 Student Edition*. Os resultados obtidos corroboraram os resultados teóricos e de simulação pois a superfície obtida corresponde à superfície da face de 5 pintas do dado na distância correta.

O método da telemetria por impulsos baseia-se na determinação do tempo-de-voo que um impulso de luz demora a viajar desde um emissor até ao alvo e depois de volta ao detetor. Efetuou-se um estudo sobre a forma de medir distâncias aplicando este método. Utilizando o mesmo software de programação, elaborou-se um programa que simula a aplicação deste método na medida de distâncias de aproximadamente 50 m. Obteve-se um resultado que comprova a teoria estudada. Os erros de medida obtidos são expectáveis e estão devidamente fundamentados, comprovando que este método tem capacidades excepcionais para medir distâncias longas (acima das dezenas de metros) mas tem grandes limitações em distâncias reduzidas. Com o aumento das frequências do relógio que controla a contagem, é possível diminuir a distância mínima a que o método é eficaz. No futuro, com o desenvolvimento da tecnologia e o consequente melhoramento dos circuitos integrados para que suportem frequências mais altas, será possível melhorar o comportamento deste método em distâncias inferiores ao metro. Embora não se tenha efetuado nenhuma experiência com este método, estudou-se uma montagem experimental e desenvolveu-se uma placa PCB com o auxílio do software EAGLE 7.2.0 que permitirá aplicar este método na medida de distâncias, num trabalho futuro.

O método da telemetria por comparação de fase deteta a luz refletida pelo alvo de forma coerente para obter o desvio de fase ótico entre o sinal emitido e o recebido. Efetuou-se um estudo onde se explica como medir distâncias aplicando este método. Utilizando o software de programação referido anteriormente, elaborou-se um programa que simula a aplicação deste método na medida de distâncias de aproximadamente 50 cm. Obteve-se um resultado expectável face aos resultados teóricos, como foi devidamente explicado na dissertação. Embora não se tenha efetuado nenhuma experiência com este método, estudou-se uma montagem experimental e desenvolveu-se uma placa PCB com o auxílio do software EAGLE 7.2.0 que permitirá aplicar este método na medida de distâncias, num trabalho futuro.

No método da interferometria a distância é medida através da diferença de fase entre duas ondas, em que uma das ondas é conhecida. Efetuou-se um estudo acerca da forma como medir distâncias aplicando este método. Utilizando o software de programação já referido, elaborou-se um programa que simula a aplicação deste método na medida de distâncias de aproximadamente 5 μm . O resultado obtido foi condizente com a teoria estudada. É um método complexo pois envolve medidas de distância na ordem dos nanómetros e dispendioso devido ao interferómetro que normalmente é constituído por espelhos de primeira superfície, um laser e um detetor. Assim, não se desenvolveu nenhuma experiência física para testar o método. No entanto, o método está devidamente descrito e simulado na dissertação, pelo que se propõe, como trabalho futuro, o desenvolvimento de um interferómetro baseado nos resultados teóricos e de simulação desta dissertação.

Em suma, os objetivos da dissertação foram cumpridos.

6.2. Perspetivas de trabalho futuro

Como perspetivas de trabalho futuro propõe-se efetuar as experiências físicas projetadas no método da telemetria, para comparar os dados obtidos na prática com os resultados obtidos nesta dissertação.

Além do desenvolvimento das experiências físicas referidas anteriormente, propõe-se a elaboração de um estudo acerca da possibilidade de conjugar os métodos estudados de modo a obter uma ou várias aplicações que incorporem um sistema de medida capaz de funcionar desde os nanómetros até aos quilómetros. Na realidade militar atual, pretende-se cada vez mais retirar o soldado convencional do campo de batalha, substituindo o Homem pelas máquinas, como por exemplo, robôs. Um sistema de medida eficaz e robusto incorporado num robô pode ser crucial em diferentes tarefas necessárias numa missão, conseguindo, por exemplo, determinar a distância até um engenho explosivo com precisão de modo a afastar as pessoas do local num raio de segurança. Este é um exemplo entre muitos outros.

Referências Bibliográficas

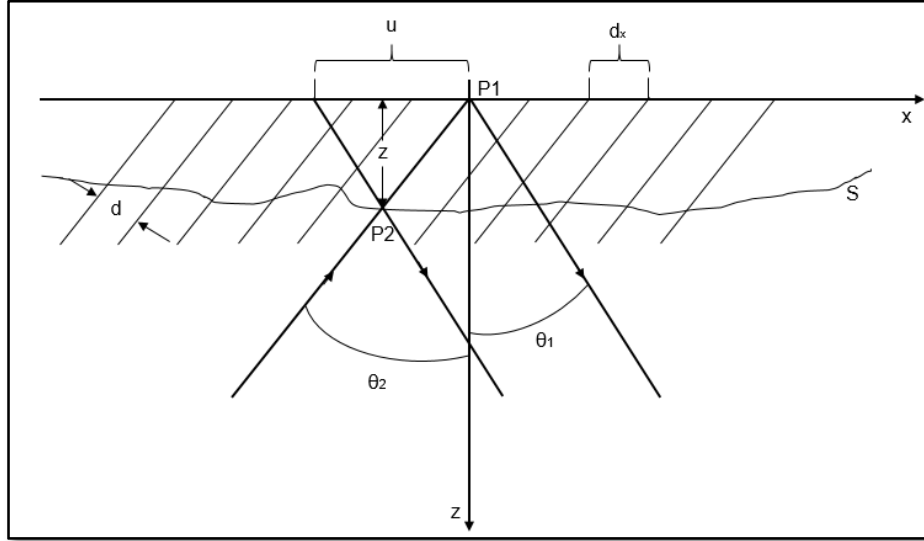
- [1] C. Sousa, “Metrologia - Notas Históricas,” 2010.
- [2] D. (Obituaries), Physics e S. a. Technology, “Theodore Maiman, 79, Dies; Demonstrated First Laser - New York Times,” [Online]. Available: http://www.nytimes.com/2007/05/11/obituaries/11maiman.html?_r=0. [Acedido em 16 Novembro 2015].
- [3] M.-C. Amann, T. Lescure, R. Myllyla e M. Rioux, “Laser ranging: a critical review of usual techniques for distance measurement,” *Opt. Eng.* 40, pp. 10-19, Janeiro 2001.
- [4] R. Farcy, Applications des lasers - Principe optiques avec problèmes commentés, Paris: Masson, 1992.
- [5] G. Berkovic e E. Shafir, “Optical methods for distance and displacement measurements,” *Advances in Optics and Photonics* 4, pp. 441-471, 11 Setembro 2012.
- [6] K. J. Gasvik, “Moiré Methods. Triangulation,” em *Optical Metrology - Third Edition*, Chichester, Wiley, 2002, pp. 179-190.
- [7] G. Beheim e K. Fritsch, “Range finding using frequency-modulated laser diode,” *Applied Optics*, Vol/25, No 9, pp. 1439-1442, 1 Maio 1986.
- [8] S. Morgott, “Range Finding Using Pulse Lasers,” 10 Setembro 2004. [Online]. Available: http://www.osram-os.com/osram_os/en/.
- [9] S. M. Nejad e S. Olyaei, “Comparison of TOF, FMCW and Phase-Shift Laser Range-Finding Methods by Simulation and Measurement,” *Quarterly Journal of Technology & Education*, vol. 1, pp. 11-18, Outubro 2006.
- [10] A. C. Thole, “LADAR Basics,” 2006. [Online]. Available: <http://www.adamthole.com/ee/>. [Acedido em 15 Novembro 2015].
- [11] A. Cabral e J. M. Rebordão, “Metrologia absoluta de comprimento por interferometria de varrimento de frequência,” 2001. [Online]. Available: http://www.spmet.pt/Eventos/Encontro2/Alexandre_Cabral.pdf. [Acedido em 20 Novembro 2015].
- [12] H. Kikuta, K. Iwata e R. Nagata, “Distance measurement by the wavelength shift of laser diode light,” *Applied Optics*, vol. 25, pp. 2976-2979, 1986.

- [13] S. C. Zilio, "Óptica Moderna - Fundamentos e Aplicações," 2009. [Online]. Available: <http://www.fisica.net/optica/Optica-Moderna.pdf>. [Acedido em 23 Novembro 2015].
- [14] Laboratório Avançado de Física, "Interferómetro de Fabry-Perot," 2012. [Online]. Available: http://www.ifsc.usp.br/~lavfis/images/BDApostilas/ApFabryPerot/FabryPerot_1.pdf. [Acedido em 25 Novembro 2015].
- [15] A. Alexandrova, V. Tzoganis e C. Welsch, "Laser diode self-mixing interferometry for velocity measurements," *Optical Engineering* 54(3), 4 Março 2015.
- [16] S. Donati e M. Norgia, "Self-Mixing Interferometry for Biomedical Signals Sensing," *IEEE Journal of selected topics in quantum electronics*, vol. 20, Março/Abril 2014.
- [17] R. A. B. JR., "Moiré Tutorial," [Online]. Available: http://www.deg.ufla.br/site/_adm/upload/file/Roberto/TutorialMOIRE.pdf. [Acedido em 14 Novembro 2015].
- [18] JDS Uniphase Corporation, "Helium-Neon Laser Heads," Edinburgh, 2005.
- [19] Newport Corporation, "818 Series Photodetector Guide," Irvine, USA, 2012.
- [20] OSRAM Optosemiconductors GmbH, "High Speed PIN Photodiode," Regensburg, 2008.
- [21] Texas Instruments Incorporated, "350-MHz LOW-NOISE HIGH-SPEED AMPLIFIERS," Dallas, Texas, 2007.
- [22] Texas Instruments, "THS4021 High-Speed Operational Amplifier Evaluation Module," 1999.
- [23] Motorola, "PRESETTABLE BDC/DECADE UP/DOWN COUNTER," Phoenix, Arizona.
- [24] R&E International, Inc, "digchip," [Online]. Available: <https://www.digchip.com/datasheets/parts/datasheet/397/SCL4511BE-pdf.php>. [Acedido em 16 Setembro 2016].
- [25] SGS-THOMSON Microelectronics, "CMOS BCD-TO-SEVEN SEGMENT LATCH/DECODER/DRIVER," Novembro 1996. [Online]. Available: <https://www.digchip.com/datasheets/parts/datasheet/456/HCC4511BF.php>. [Acedido em 15 Setembro 2016].
- [26] Kingbright, "13.2mm (0.52INCH) SINGLE DIGIT NUMERIC DISPLAY," 2011.
- [27] Farnell, "Crystal Oscillator," [Online]. Available: <http://www.farnell.com/datasheets/57482.pdf>. [Acedido em 29 Setembro 2016].

- [28] Texas Instruments, "High-Speed CMOS Logic Phase-Locked Loop with VCO," Texas Instruments Incorporated, Dallas, Texas, 2003.
- [29] Texas Instruments, "ADC0820-N 8 Bit High Speed P Compatible A/D Converter with Track/Hold Function," Texas Instruments Incorporated, Dallas, Texas, 2013.
- [30] Avago Technologies, "HLMP-Yxxx," Estados Unidos da América, 2014.

Apêndice 1

A expressão (5) resulta da multiplicação de 3 fatores: o fator de ampliação da lente (m), a distância perpendicular entre o objeto e a sua superfície (s) e o fator geométrico. Para deduzir o fator geométrico, recuperou-se a Figura 8 do capítulo 3.1, que mostra as franjas, separadas por uma distância d , projetadas num plano xy segundo um ângulo θ_2 em relação ao eixo z .



O período da franja ao longo do eixo x é dado pela expressão (16).

$$d_x = \frac{d}{\cos\theta_2} \quad (16)$$

Pela Figura 8, observa-se que o ponto originalmente posicionado em P1 foi deslocado para P2, no seguimento da franja. Este deslocamento é dado pela expressão (17), onde z é a altura de P2 abaixo do plano xy e θ_1 é o ângulo refletido.

$$u = z(\tan\theta_2 + \tan\theta_1) \quad (17)$$

Assim, tem-se que a função de modulação é dada pela expressão (18), onde G é o fator geométrico.

$$\psi(x) = \frac{u}{d_x} = \frac{z(\tan\theta_2 + \tan\theta_1)}{d/\cos\theta_2} = \frac{z}{d}(\sin\theta_2 + \cos\theta_2\tan\theta_1) = \frac{z}{d}\frac{\sin(\theta_1 + \theta_2)}{\cos\theta_1} = \frac{z}{d}G \quad (18)$$

Assim, observando a Figura 9, tem-se que o deslocamento s' é dado pela expressão (5) do capítulo 3.1.

$$s' = m \frac{s \times \sin(\theta_1 + \theta_2)}{\cos\theta_1} = ms(\tan\theta_1\cos\theta_2 + \sin\theta_2) \quad (5)$$

Apêndice 2

Este apêndice contém as linhas de código dos quatro programas desenvolvidos.

Método da triangulação

```
Lista={};
Lista2={};
Lista3={};
Lista4={};
Detetor={};
DetetorFinal={};
dim=30;
x1=0;
y1=0;
i=1;
j=1;
l=1;
m=1;
quadrado=0;
distancia=0;
quadrado2=0;
distancia2=0;
quadrado3=0;
distancia3=0;
quadrado4=0;
distancia4=0;
contador=0;
contador2=0;
contador3=0;
contador4=0;
a=0;
b=0;
c=0;
d=0;
For[x1=0,x1< dim,x1++,
  For[y1=0, y1<dim,y1++,

If[( (x1==7||x1==13||x1==14||x1==15||x1==16||x1==17||x1
==23)&&(y1==0||y1==1||y1==2||y1==3||y1==4||y1==5||y1==
6||y1==7||y1==8||y1==9||y1==10||y1==11))||( (x1==8||x1=
=12||x1==18||x1==22)&&(y1==0||y1==1||y1==2||y1==3||y1=
=4||y1==5||y1==6||y1==7||y1==8||y1==9||y1==10))||( (x1=
=9||x1==11||x1==19||x1==21)&&(y1==0||y1==1||y1==2||y1=
=3||y1==4||y1==5||y1==6||y1==7||y1==8||y1==9))||( (x1==
```

```

10 || x1==20) && (y1==0 || y1==1 || y1==2 || y1==3 || y1==4 || y1==5
|| y1==6 || y1==7 || y1==8) , k=1, k=0];
    AppendTo[Lista, {x1, y1, i, k}];
    i++;
  ];
];
For[a=0, a<=dim-13, a++,
  det=dim+dim*a;
  For[d=0, d<=3, d++,
    For[b=(det+dim*12)-d, b>=1, b=b-(dim+3),
      If[Lista[[b, 4]]==1,
        c=b;
        tent=0;
        While[c>=det-d,
          c=c-(dim-3);
          tent++;
          If[c==det-
d&& tent<=dim/3&& Lista[[b+dim+3, 4]]!=1&& Lista[[b+1, 4]]!=
=1,
          quadrado=Lista[[b, 3]];
          distancia=(6/Tan[0.321839]+d);
          contador++;
          AppendTo[Detetor, {quadrado, 3, distancia}];
          AppendTo[Detetor, {quadrado, 7, distancia}];

AppendTo[DetetorFinal, {contador, 3, distancia}];

AppendTo[DetetorFinal, {contador, 7, distancia}];
    ];
  ];
];
];
];
];
For[x1=0, x1< dim, x1++,
  For[y1=0, y1<dim, y1++,

If[( (x1==7 || x1==8 || x1==9 || x1==10 || x1==11 || x1==12 || x1==
18 || x1==19 || x1==20 || x1==21 || x1==22 || x1==23) && (y1==0 || y
1==1 || y1==2 || y1==3 || y1==4 || y1==5 || y1==6 || y1==7 || y1==8 |
| y1==9 || y1==10 || y1==11) ) || ( (x1==13 || x1==17) && (y1==0 || y
1==1 || y1==2 || y1==3 || y1==4 || y1==5 || y1==6 || y1==7 || y1==8 |
| y1==9 || y1==10) ) || ( (x1==14 || x1==16) && (y1==0 || y1==1 || y1
==2 || y1==3 || y1==4 || y1==5 || y1==6 || y1==7 || y1==8 || y1==9) )
|| ( (x1==15) && (y1==0 || y1==1 || y1==2 || y1==3 || y1==4 || y1==5
|| y1==6 || y1==7 || y1==8) ) , k=1, k=0];
    AppendTo[Lista2, {x1, y1, j, k}];

```

```

        j++;
    ];
];
For[a=0,a<=dim-13,a++,
    det=dim+dim*a;
    For[d=0,d<=3,d++,
        For[b=(det+dim*12)-d, b>=1,b=b-(dim+3),
            If[Lista2[[b,4]]==1,
                c=b;
                tent=0;
                While[c>=det-d,
                    c=c-(dim-3);
                    tent++;
                    If[c==det-
d&&tent<=dim/3&&Lista2[[b+dim+3,4]]!=1&&Lista2[[b+1,4]
] !=1,
                        quadrado2=Lista2[[b,3]];
                        distancia2=(6/Tan[0.321839]+d);
                        contador2++;
                        AppendTo[Detetor,{quadrado2,5,distancia2}];

AppendTo[DetetorFinal,{contador2,5,distancia2}];
                    ];
                ];
            ];
        ];
    ];
];
For[x1=0,x1< dim,x1++,
    For[y1=0, y1<dim,y1++,

If[(x1==7||x1==8||x1==9||x1==10||x1==11||x1==12||x1==
13||x1==14||x1==15||x1==16||x1==17||x1==18||x1==19||x1
==20||x1==21||x1==22||x1==23)&&(y1==0||y1==1||y1==2||y
1==3||y1==4||y1==5||y1==6||y1==7||y1==8||y1==9||y1==10
||y1==11)),k=1,k=0];
        AppendTo[Lista3,{x1,y1,l,k}];
        l++;
    ];
];
For[a=0,a<=dim-13,a++,
    det=dim+dim*a;
    For[d=0,d<=3,d++,
        For[b=(det+dim*12)-d, b>=1,b=b-(dim+3),
            If[Lista3[[b,4]]==1,
                c=b;
                tent=0;

```

```

        While[c>=det-d,
            c=c-(dim-3);
            tent++;
            If[c==det-
d&&tent<=dim/3&&Lista3[[b+dim+3,4]]!=1&&Lista3[[b+1,4]
]!=1,
                quadrado3=Lista3[[b,3]];
                distancia3=(6/Tan[0.321839]+d);
                contador3++;
                AppendTo[Detetor,{quadrado3,1,distancia3}];
                AppendTo[Detetor,{quadrado3,9,distancia3}];

AppendTo[DetetorFinal,{contador3,1,distancia3}];

AppendTo[DetetorFinal,{contador3,9,distancia3}];
        ];
    ];
];
];
];
For[x1=0,x1< dim,x1++,
    For[y1=0, y1<dim,y1++,

If[(x1==7||x1==8||x1==9||x1==10||x1==11||x1==12||x1==
13||x1==14||x1==15||x1==16||x1==17||x1==18||x1==19||x1
==20||x1==21||x1==22||x1==23)&&(y1==0||y1==1)),k=1,k=0
];
        AppendTo[Lista4,{x1,y1,m,k}];
        m++;
    ];
];
For[a=0,a<=dim-13,a++,
    det=dim+dim*a;
    For[d=0,d<=13,d++,
        For[b=(det+dim*12)-d, b>=1,b=b-(dim+3),
            If[Lista4[[b,4]]==1,
                c=b;
                tent=0;
                While[c>=det-d,
                    c=c-(dim-3);
                    tent++;
                    If[c==det-
d&&tent<=dim/3&&Lista4[[b+dim+3,4]]!=1&&Lista4[[b+1,4]
]!=1,
                        quadrado4=Lista4[[b,3]];
                        distancia4=(6/Tan[0.321839]+d);

```

```

        contador4++;
        AppendTo[Detetor,{quadrado4,0,distancia4}];
        AppendTo[Detetor,{quadrado4,10,distancia4}];

AppendTo[DetetorFinal,{contador4,0,distancia4}];

AppendTo[DetetorFinal,{contador4,10,distancia4}];
    ];
    ];
    ];
    ];
    ];
    ];
ListContourPlot[DetetorFinal,InterpolationOrder->3]

```

Método da telemetria por impulsos

```

Lista={};
Detetor={};
x1=0;
y1=0;
i=1;
k=0;
quadrado=0;
a=6;
b=0;
c=0;
d=0;
n=0;
m=0;
For[x1=0,x1< 5,x1++,
    For[y1=0, y1<50,y1++,
        If[(x1==2)&&(y1==0),k=1,k=0];
        AppendTo[Lista,{x1,y1,i,k}];
        i++;
    ];
];
det=150;
For[b=det, b>=1,b=b-1,
    a--;
    If[a==0, a=6;n++;];
    If[Lista[[b,4]]==1,
        c=b;
        d=a;
        m=n;
    ];
];

```

```

While[c<det,
  c=c+1;
  d--;
  If[d==0, d=6;m++;];
  If[c==det,
    quadrado=Lista[[b,3]];
    distancia=300000000*m/(2*500000000);
    AppendTo[Detetor, {quadrado, distancia}];
  ];
];
];
];
Detetor

```

Método da telemetria por comparação de fase

```

Lista={};
Detetor={};
x1=0;
y1=0;
i=1;
quadrado=0;
distancia=0;
b=0;
c=0;
saltos=0;
Dref=10;
fm1=30000000;
fm2=30500000;
lamda1=299792458/fm1;
lamda2=299792458/fm2;
gama1=2*Pi*2*Dref/(100*lamda1);
gama2=2*Pi*2*Dref/(100*lamda2);
gama11=0;
gama22=0;
fase1=0;
fase2=0;
R=0;
For[x1=0,x1< 5,x1++,
  For[y1=0, y1<50,y1++,
    If[(x1==2)&&(y1==0),k=1,k=0];
    AppendTo[Lista,{x1,y1,i,k}];
    i++;
  ];
];

```

```

det=150;
For[b=det, b>=1,b=b-1,
  saltos++;
  If[Lista[[b,4]]==1,
    c=b;
    While[c<=det,
      c=c+1;
      saltos++;
      If[c==det,
        quadrado=Lista[[b,3]];
        gama11=2*Pi*(saltos+1)/(100*lamda1);
        gama22=2*Pi*(saltos+1)/(100*lamda2);
        fase1=gama11-gama1;
        fase2=gama22-gama2;
        R=299792458*(fase1-fase2)/(4*Pi*(fm1-fm2));
        distancia=Dref/100+R;
        AppendTo[Detetor,{quadrado,N[distancia]}];
      ];
    ];
  ];
];
Detetor

```

Método da interferometria

```

Lista={};
Detetor={};
x1=0;
y1=0;
i=1;
quadrado=0;
distancia=0;
saltos=0;
a=0;
b=0;
c=0;
d=0;
REF=1/100;
fm1=4610000000000000;
fm2=4620000000000000;
lamda1=299792458/fm1;
lamda2=299792458/fm2;
lamda=lamda1-lamda2;
gama1=2*Pi*2*REF/lamda1;

```



```

gama2=2*Pi*2*REF/lamda2;
gama11=0;
gama22=0;
fase1=0;
fase2=0;
R=0;
For[x1=0,x1< 5,x1++,
  For[y1=0, y1<5,y1++,
    If[(x1==2)&&(y1==0),k=1,k=0];
    AppendTo[Lista,{x1,y1,i,k}];
    i++;
  ];
];
det=15;
saltos=0;
For[b=det, b>=1,b=b-1,
  saltos++;
  If[Lista[[b,4]]==1,
    c=b;
    saltos1=saltos;
    While[c<=det,
      c=c+1;
      saltos1++;
      If[c==det&&Lista[[b+1,4]]!=1,
        quadrado=Lista[[b,3]];
        gama11=2*Pi*(2*REF+(saltos1+1)/1000000)/lamda1;
        gama22=2*Pi*(2*REF+(saltos1+1)/1000000)/lamda2;
        fase1=gama11-gama1;
        fase2=gama22-gama2;
        R=(fase2-fase1)*lamda1*lamda1/(4*Pi*lamda);
        distancia=REF+R;
        AppendTo[Detetor,{quadrado,N[distancia,9]}}];
      ];
    ];
  ];
];
Detetor

```